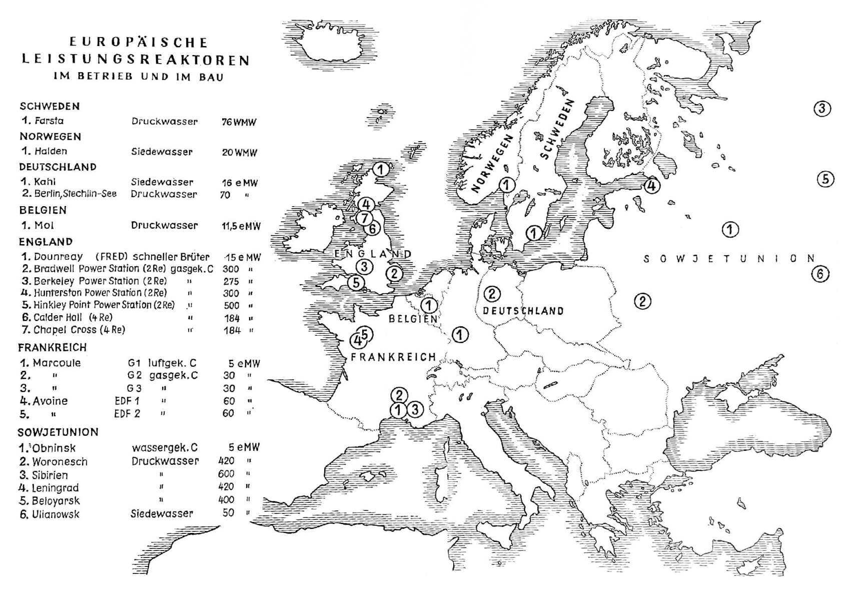
LEXIKON DER KERN- UND REAKTOR-TECHNIK

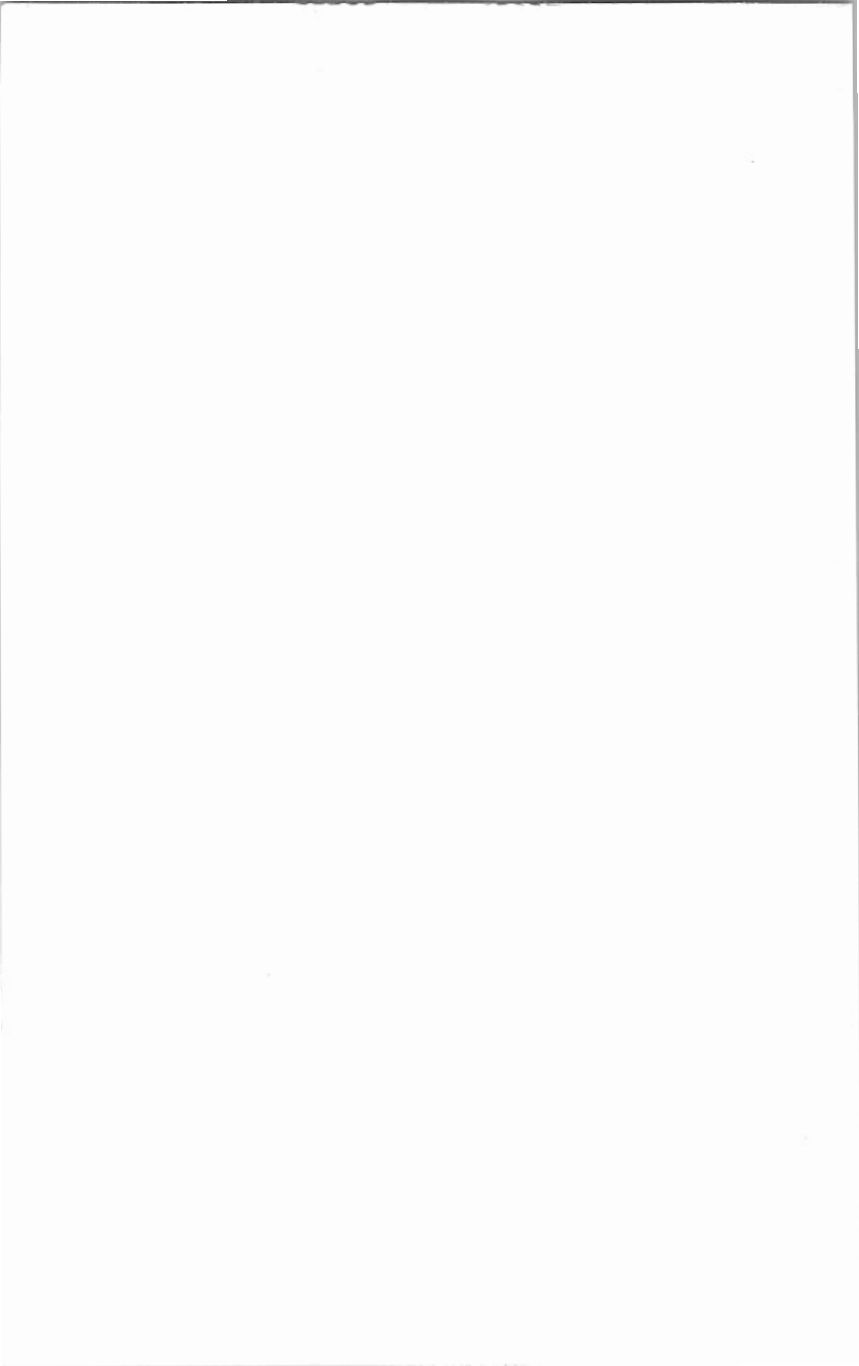
HÖCKER-WEIMER



EUROPÄISCHE
LEISTUNGSREAKTOREN
IM BETRIEB UND IM BAU
SCHWEDEN
1. Farsta Druckwasser 76 WMW
NORWEGEN
1. Halden Siedewasser 20 WMW
DEUTSCHLAND
1. Kahl Siedewasser 16 eMW
2. Berlin, Stechlin-See Druckwasser 70 "
BELGIEN
1. Mol Druckwasser 11,5 eMW
ENGLAND
1. Dounreay (FRED) schneller Brüter 15 eMW
2. Bradwell Power Station (2 Re) gasgek. C 300 "
3. Berkeley Power Station (2 Re) " 275 "
4. Hunterston Power Station (2 Re) " 300 "
5. Hinkley Point Power Station (2 Re) " 500 "
6. Calder Hall (4 Re) " 184 "
7. Chapel Cross (4 Re) " 184 "
FRANKREICH
1. Marcoule G1 luftgek. C 5 eMW
2. " G2 gasgek. C 30 "
3. " G3 " 30 "
4. Avoine EDF 1 " 60 "
5. " EDF 2 " 60 "
SOWJETUNION
1. Obninsk wassergek. C 5 eMW
2. Woronesch Druckwasser 420 "
3. Sibirien " 600 "
4. Leningrad " 420 "
5. Beloyarsk " 400 "
6. Ulianowsk Siedewasser 50 "
NORWEGEN
SCHWEDEN
ENGLAND
BELGIEN
DEUTSCHLAND
FRANKREICH
SOWJETUNION


AMERIKANISCHE
LEISTUNGSREAKTOREN
IM BETRIEB UND IM BAU
KANADA
1. Des Joachims, Druckwasser 20 eMW
VEREINIGTE STAATEN
1. Vallecitos, Cal. Siedewasser 5 eMW
2. Santa Susana, SRE Na-C 6,5 "
3. Arco Idaho, EBR schneller Bruter 20 "
4. " Siedewasser 0,2 "
5. " schneller Bruter 0,2 "
6. Lemont, Jll. EBWR Siedewasser 5 "
7. Dresden, Jll. Siedewasser 180 "
8. Rowe, Mass. Druckwasser 134 "
9. Monroe, Mich. PRDC schnell 100 "
10. Indian Point, N.Y. Druckwasser 163 "
11. Shippingport, Penn. PWR Druckw. 60-100 "
12. Oak Ridge, Tenn. HRT Homogen 0,3 "
13. Fort Belvoir, Virg. APPR Druckwasser 2 "
KANADA
VEREINIGTE
STAATEN

LEXIKON DER KERN- UND REAKTORTECHNIK



Lexikon der Kern- und Reaktortechnik

Herausgegeben von

K. H. Höcker und K. Weimer

Band I: A-K



FRANCKH'SCHE VERLAGSHANDLUNG
STUTTGART

Schutzumschlag von Erich Fehrle

Insgesamt 310 Abbildungen im Text

Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co., Stuttgart / 1959 /

Printed in Germany / Verlagsnummer 2946 Str / Gesamtherstellung: Konrad Triltsch, Graphischer Großbetrieb, Würzburg

Verzeichnis der Sachgebiete und ihrer Bearbeiter

Atom- und Kernphysik
Prof. Dr. W. BRAUNBEK, Lehrstuhl f. theor. Physik d. Universität Tübingen. [1]

Isotopentrennung
Prof. Dr. W. GROTH, Institut f. phys. Chemie d. Universität Bonn. [14]

Vollständig ionisierte Plasmen, Magnetohydrodynamik
H. J. KÄPPELER, Abt. Reaktorphysik im Institut f. theor. u. angew. Physik d. Technischen Hochschule Stuttgart. [27]

Reaktorphysik, Fusion
Prof. Dr. K. H. HÖCKER, Abt. Reaktorphysik im Institut f. theor. u. angew. Physik d. Technischen Hochschule Stuttgart. [7]

Reaktordynamik, Transporttheorie
Dr. H. GRÜMM, Reaktorabteilung Simmering-Graz-Pauker, Wien. [13]

Brennstoffzyklen
AEG Kernenergieanlagen, Frankfurt/Main. [12]

Thermodynamik u. Wärmeübertragung
Dr. W. KELLER, Siemens-Schuckertwerke, Reaktorentwicklung, Erlangen. [5]

Wärmetechnik u. Konstruktionselemente
Dr. W. JUNKERMANN, Babcock u. Wilcox, Dampfkesselwerke AG, Oberhausen/Rheinl. [8]

Kernverfahrenstechnik
Prof. Dr. W. MIALKI, Institut f. allgem. u. Kernverfahrenstechnik d. Technischen Universität Berlin, Berlin-Charlottenburg. [2]

Steuern und Regeln
Dr. H. SCHULTZ, Kernreaktor-Bau- u. Betriebsgesellschaft Karlsruhe. [9]

Reaktorbeschreibungen
Dipl.-Phys. M. RITZI, Abt. Reaktorphysik im Institut f. theor. u. angew. Physik der Technischen Hochschule Stuttgart. [25]

Reaktorkraftwerke

Dr. H. Schenk, Energieversorgung Schwaben, Stuttgart. [21]

Strahlenphysik

Dr. F. Herre, Farbwerke Hoechst, Frankfurt/Main. [26]

Neutronenphysik

Dr. K. F. Alexander, Zentralinstitut f. Kernphysik, Rossendorf b. Dresden. [11]

Metallkunde

Prof. Dr. E. Gebhardt, Max-Planck-Institut f. Metallkunde und Technische Hochschule Stuttgart. [4]

Reaktorwerkstoffe

Dr. G. Matz, DEGUSSA, Deutsche Gold- und Silber-Scheideanstalt, vormals Roessler, Frankfurt/Main, z. Z. Kernreaktor-Bau- u. Betriebsgesellschaft Karlsruhe. [20]

Radiochemie

Prof. Dr. W. Seelmann-Eggebert, Kernreaktor-Bau- u. Betriebsgesellschaft und Technische Hochschule Karlsruhe. [3]

Strahlenchemie

Dr. S. Rösinger, Farbwerke Hoechst, Frankfurt/Main. [18]

Brennstoffaufbereitung

Dr. S. Krawczynski, Kernreaktor-Bau- u. Betriebsgesellschaft Karlsruhe. [22]

Strahlenschutz

Prof. Dr. B. Rajewsky, Max-Planck-Institut f. Biophysik, Frankfurt/Main. [17]

Radiologie

Prof. Dr. H. Langendorff, Radiologisches Institut d. Universität Freiburg. [28]

Isotopentechnik

Dipl.-Phys. G. Pröpstl, Isotopenstudiengesellschaft e.V., Frankfurt/Main. [16]

Meßgeräte, Elektronik

Dr. E. Busse, Arbeitsgemeinschaft f. Kerntechnik der technisch-wissenschaftlichen Vereine, Düsseldorf. [6]

Instrumentierung am Reaktor
Dr. A. WENSEL, Institut f. Kernphysik d. Universität Frankfurt/Main. [19]
Spezielle Geräte der Kerntechnik
Dipl.-Ing. K. WEIMER, Physikalische Studiengesellschaft Düsseldorf. [10]
Forschungsstellen, Organisationen
W. D. MÜLLER, „Die Atomwirtschaft", Verlag Handelsblatt, Düsseldorf. [24]
Beratung bei französischen Fachausdrücken
M. PLUCHERY, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Grenoble (Isère), Frankreich.

Anhang

Band I: Tabellen

Band II: Nachtrag und Wörterverzeichnisse



Vorwort

Als erste Aufgabe eines Lexikons in dem jungen Gebiet der Kernenergie empfinden wir die Verpflichtung, Helfer zu sein für alle diejenigen, die direkt oder indirekt beruflich damit zu tun haben oder außerberuflich daran interessiert sind. Während der Wissenschaftler, Techniker oder Lehrer bei auftretenden Fragen in seinem Fachgebiet gewöhnlich in der einschlägigen Literatur nachzuschlagen vermag, fällt dies weniger leicht bei Fragen in Nachbargebieten. Die Kernenergienutzung ist aber gerade dadurch gekennzeichnet, daß Physiker, Chemiker, Ingenieure der verschiedensten Richtungen, Metallkundler und Radiologen in sinnvoller Weise zusammenarbeiten. Allen, die in irgendeiner Weise angesprochen sind, soll das Lexikon eine kompendienhafte Orientierung bieten. Dabei wurde Wert darauf gelegt, eine klare Definition der Begriffe und anschließend eine Erläuterung zu geben.

Bei der Durchführung unseres Programms ergab sich die Schwierigkeit, daß eine Anzahl von Begriffen in der deutschen Sprache nicht heimisch ist. In dem Maße, in dem Begriffe aus der Wissenschaftssphäre in die Konstruktionssäle und Werkstätten der Technik übergehen, sollten dafür sinnvolle deutsche Begriffe vorliegen. Außerdem haben sich an verschiedenen Orten verschiedene Bezeichnungen eingebürgert. Um unzweckmäßige und unschöne sprachliche Bildungen zu unterdrücken, (z. B. ge-*can*-ter Brennstoff), hat der Ausschuß für Begriffsbestimmungen in der Arbeitsgemeinschaft für Kerntechnik, die von den wissenschaftlich-technischen Vereinen des Bundesgebiets ins Leben gerufen wurde, in der Zeitschrift „Die Atomwirtschaft" zwei Listen publiziert, die solche Ausdrücke enthalten. Diesen Empfehlungen haben wir uns angeschlossen, darüber hinaus jedoch im Verdeutschen Zurückhaltung geübt.

Die Akzente auf den einzelnen Gebieten sind verschieden, insbes. wurden Grundlagen wie reine Atom- und Kernphysik überschlägig aus bestimmtem Blickwinkel behandelt.

Jedem Begriff sind die englischen und französischen Bezeichnungen beigefügt. Dies mag teils zur Klarstel-

lung, teils zur Erleichterung der internationalen Verständigung dienen. Dabei ist der französische Term nicht immer eindeutig festgelegt, da man in Frankreich ähnlich wie bei uns bemüht ist, den aus dem Amerikanischen kommenden Laborjargon in sprachlich erträgliche Formen zu bringen, was nicht abgeschlossen ist.

Man ist international bemüht, die Begriffe der Kernverfahrenstechnik zu „normen" *(International Standard Organization, Technical Committee 85)*. Von nationalen und internationalen Komitees sind Vorschläge ausgearbeitet. Am verbreitetsten sind die amerikanischen Vorschläge im *Glossary of Terms in Nuclear Science and Technology*. Diese und andere Unterlagen, die bei weitem nicht so umfassend sind, wie das vorliegende Lexikon, wurden berücksichtigt, um verschiedenartige Definitionen zu vermeiden.

Das Lexikon enthält außer einer Erklärung von Stichwörtern tabellarische Zusammenstellungen über Reaktoren, Isotope usw., die ihres Umfangs wegen als Anhang zu Band I wiedergegeben wurden. Die Gegenstände der Tabellen sind aus dem Inhaltsverzeichnis zu entnehmen. Der Schluß des II. Bandes enthält ein Wörterverzeichnis englisch-deutsch, französisch-deutsch. Hinweise auf weitere Stichwörter sind durch einen vorgesetzten Stern gegeben, sofern dort weiterführende Erläuterungen zu finden sind.

Unter den Literaturangaben wird man häufig Hinweise auf AEC-Berichte, z. B. ORNL 57-4-95 oder TIT 7534 oder AEDC-4371 finden. Diese Einzelberichte sind, soweit sie aus den USA kommen, vom *United States Government Printing Office, Division of Public Documents, Washington 25, D.C.*, zu erhalten. Berichte aus europäischen Ländern (AERE, CEA, JENER) und Kanada (AECL) können über das Gmelin-Institut für anorganische Chemie und Grenzgebiete in der Max-Planck-Gesellschaft, Frankfurt/Main, Carl-Bosch-Haus, Varrentrappstr. 40–42 bezogen werden.

Besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. H. Fränz, Phys. Techn. Bundesanstalt Braunschweig, der Teile des Manuskripts des zweiten Bandes kritisch gelesen und zahlreiche Verbesserungsvorschläge gemacht hat.

Januar 1959 *K. H. Höcker K. Weimer*

A

A. B. Atomenergi. Halbstaatliche Aktiengesellschaft, in deren Händen die praktische Anwendung der Atomenergie in Schweden liegt. [24]

Abbildung mit Röntgen-Strahlen und γ-Strahlen. Röntgen- und γ-Strahlen breiten sich geradlinig wie Lichtstrahlen aus, sie lassen sich aber nicht durch Linsen oder Spiegel in ihrer Richtung ablenken. Eine A. ist deshalb nur durch eine einigermaßen zentrale oder parallele Projektion möglich. Der Idealfall wäre deshalb ein punktförmiges Strahlenzentrum. Eine Blende hält die für die Bildgebung überflüssigen Strahlen zurück. Je stärker die Ausblendung erfolgt, desto schärfer ist die Kontrastgebung des Röntgen-Bildes. Bei guten Blenden wird die Streustrahlung bis zu etwa 90 % unwirksam gemacht. [28]
engl.: X-ray picture
franz.: projection aux rayons X

Abbrand, bezeichnet

1. die dem Brennstoff während des Reaktorbetriebs entnommene Energie. Die Angabe wird meist auf die Gewichtseinheit Brennstoff bezogen. Einheit: MWd/t);
2. den auf den anfänglichen Spaltstoffgehalt bezogenen Prozentsatz an Spaltstoff, der während des Reaktorbetriebs durch Spaltungen und Einfänge (n, γ-Prozesse) verbraucht worden ist.

Der maximal erreichbare A. in beiderlei Definition hängt theoretisch von der verfügbaren *Überschußreaktivität ab. In der Praxis werden die Grenzen jedoch wegen der Bestrahlungsschäden an den Brennstoffelementen oft vorher erreicht.

Für den Reaktorbetrieb ist der mittlere A. von Bedeutung. Wegen des räumlich nicht konstanten Neutronenflusses wird der maximal zulässige A. an verschiedenen Orten der Brennstoffüllung zu verschiedenen Zeitpunkten erreicht. Bei *Chargenbetrieb erreicht man also nur einen mittleren betrieblichen A. Dieser läßt sich durch folgende konstruktive und betriebliche Maßnahmen verbessern:

1. Große eingebaute Überschußreaktivität.
2. Durch eine Konstruktion der Spaltzone, die einen räumlich möglichst konstanten Neutronenfluß gewährleistet (s. Flußabflachung).
3. Durch kurze Brennstoffelemente, von denen sich dann mehrere in einem Kanal befinden. Die Elemente können durch Umordnung im Laufe des Betriebes im Zeitmittel demselben Neutronenfluß ausgesetzt werden.

Der z. Z. erreichbare mittlere betriebliche A. liegt für Brennstoffelemente aus metallischem natürlichem Uran bei höchstens 3000 MWd/t, für keramische Elemente (z. B. aus UO_2) etwa bei 10 000 MWd/t. Diese Werte sind ziemlich unabhängig von der Anreicherung (Spaltstoffkonzentration), so daß der erreichbare prozentuale A. mit der Spaltstoffkonzentration abnimmt. Bei natürlichem Uran entsprechen 1000 MWd/t (Definition 1) etwa 14 % bei Vernachlässigung des Verbrauchs durch Absorption, bei dessen Berücksichtigung 17 % (Definition 2). [8, 12, 21]

engl.: burn-up *franz.: degré d'épuisement*

Abfall, radioaktiver, 1. zeitliche Verringerung der *Aktivität eines radioaktiven Strahlers nach dem radioaktiven Zerfallsgesetz. [16]

engl.: exponential decrease of radioactivity
franz.: décroissance exponentielle de la radioactivité

2. Die beim Betrieb von Kernreaktoren, in Kernbrennstoffaufbereitungsanlagen, radiochemischen Laboratorien, Krankenhäusern und neuerdings in steigendem Maße in der Industrie in fester, flüssiger und gasförmiger Form anfallenden radioaktiven Substanzen, die nicht als Spaltstoff weiter verwandt werden können. [22]

engl.: waste *franz.: déchet radioactif*

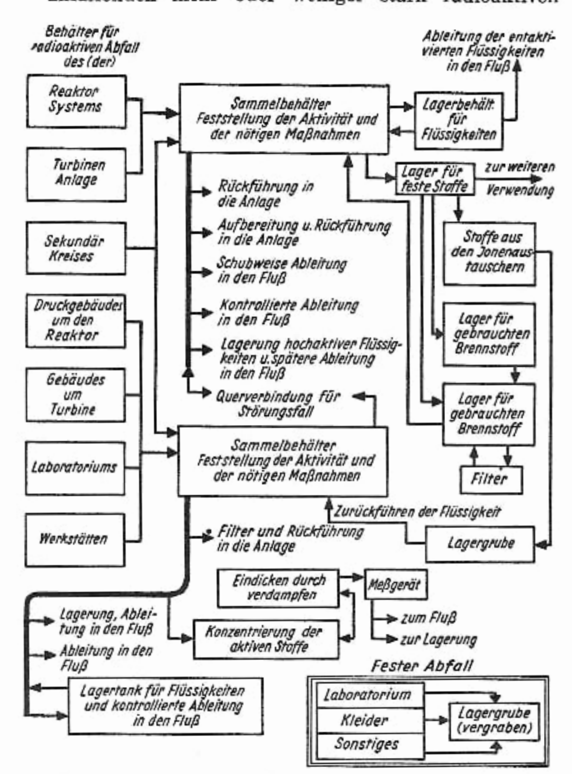
Lit.: Zu 2. W. Kumpf, B. Dieterich, J. Kumpf, Radioaktive Substanzen und Wasser, R. Oldenbourg, München, 1956. – Reactor Handbook, Bd. VI, Chemical Processing and Equipment, McGraw Hill, New York, 1956.

Abfallanalyse oder *Zerfallsanalyse. Radiochemisches Analysenverfahren, bei dem aus dem zeitlichen Abfall der radioaktiven Strahlung auf die Zusammensetzung der strahlenden Substanz geschlossen wird. Die Analyse beruht auf dem exponentiellen radioaktiven Abfall eines nicht zusammengesetzten Strahlers,

welcher sich graphisch in halblogarithmischen Koordinaten als Gerade über der Zeit darstellen läßt. Die Abfallfunktion eines zusammengesetzten Strahlers besteht in dieser Darstellungsart aus einer Superposition derartiger Abfallgeraden. Das Wesen der A. liegt in der Auflösung der gemessenen Abfallfunktion in mehrere Abfallgerade, deren Steigung und Lage Halbwertszeit und Aktivität der Einzelstrahler angeben.
In schwierigen Fällen kann die A. durch *Absorptionsanalyse und *Impulshöhenanalyse ergänzt werden. [16]
engl.: decay analysis
franz.: analyse de desintégration,
analyse par décroissance exponentielle

Abfallbeseitigung stellt ein wichtiges Problem bei der Kernenergie-Nutzung dar. Die radioaktiven Abfälle dürfen in aktivem Zustand weder in den Boden vergraben noch in das Grundwasser oder Oberflächenwasser abgelassen werden, sondern sie müssen entsprechend ihrer radiobiologischen Giftigkeit derart behandelt und gelagert werden, daß durch sie die Menschheit biologisch nicht gefährdet wird. Dazu gehört eine Entaktivierung der Abfall-Lösungen und eine absolut sichere Lagerung der radioaktiven Konzentrate, s. Abfallkonzentrierung und Abfallagerung. Eine Verdünnung der radioaktiven Abfall-Lösungen mit nicht-aktivem Wasser und eine anschließende Beseitigung in die Flüsse ist nur bei geringen Absolutmengen kurzlebiger Radioisotope bedingt anwendbar. Eine Verdünnung radioaktiver Abfall-Lösungen langlebiger Radioisotope ist aus folgenden Gründen unzulässig: Durch die Verdünnung mit Wasser verseucht man stetig das gesamte Grundwasser und damit schließlich auch das Wasser der Weltmeere. Diese Verseuchung ist über Jahrhunderte hin wirksam und durch keine Methode rückgängig zu machen. In Europa ist die Verschmutzung der Gewässer durch Industrieabwässer bereits so weit fortgeschritten, daß man eine zusätzliche Vergiftung der Oberflächenwässer und der Grundwässer durch radioaktive Chemikalien unter keinen Umständen zulassen darf. Da zur Verdünnung langlebiger radioaktiver Abwässer bis auf die Toleranzkon-

zentration große Volumina nicht-radioaktiven Wassers notwendig sind, kann diese Methode in Europa ohnehin nur in sehr beschränktem Umfang angewandt werden. Demzufolge müssen alle in einem Atomkraftwerk anfallenden mehr oder weniger stark radioaktiven



Schema einer Anlage zur Behandlung der Abfallösungen bei einem Leistungsreaktor (Siedewasser). Nach einer artgerechten Sammlung der an den verschiedenen Stellen des Werkes anfallenden radioaktiven Stoffe (Korrosionsprodukte im Primärkreis und evtl. Sekundärkreis, Korrosions- und Spaltprodukte des Brennstoffs, Stoffe aus den Aufbereitungsanlagen) wird eine Trennung in hoch- und niederaktive Stoffe durchgeführt. Erstere werden solange gelagert, bis die kurzlebige Aktivität abgeklungen ist. Dann werden ihnen die langlebigen Bestandteile entzogen. (Nach dem Entwurf für die *Dresden Nuclear Power Station in USA.)

festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe durch eine dauernd arbeitende Entaktivierungsanlage geschickt werden. Als Beispiel ist das Schema einer derartigen Einrichtung in einer Siedewasserreaktoranlage in der Abb. beigefügt. [21, 22]

engl.: waste disposal franz.: élimination des déchets

Abfall-Konzentrierung

Abfall-Konzentrierung wird in der Praxis durchgeführt:

1. Mittels chemischer Fällung (Prezipitation). Radioaktive Substanzen werden gemeinsam mit nicht radioaktiven Stoffen durch chemische Fällung teilweise aus Abwässern beseitigt. Es empfiehlt sich, eine sukzessive Fällung in mehreren Stufen. Nach Möglichkeit soll man Fällungen in verschiedenen p_H-Gebieten mit verschiedenen Fällungschemikalien durchführen. Besonders hat sich die Fällung mit Eisenchlorid, Phosphaten, Sulfaten und Aluminaten bewährt. Da die Entaktivierung der Abwässer möglichst groß sein soll, empfiehlt sich vor der Fällung allgemein eine Verdünnung der radioaktiven Abwässer mit inaktiven Isotopen derjenigen Ionen, die für die vorliegende Abfall-Lösung aktivitätsbestimmend sind (Trägerverdünnung). Verschiedene Stoffe eignen sich auch als Träger für die Fällung artfremder Isotope, so z. B. Bleisulfid als Träger für Ruthenium, Nickelferrozyanid als Träger für Strontium und Caesium. Die anfallenden radioaktiven Abfallschlämme müssen getrocknet werden, oder man rührt sie mit Zement zu Beton an und lagert die Betonsteine.

2. Mittels Verdampfung (Evaporation). Diese Methode ist universell anwendbar und vor allen Dingen bei langlebigen stark radioaktiven Abfall-Lösungen geeignet. Es sind Evaporationsanlagen in Betrieb, die mehrstufig arbeiten. Bewährt hat sich auch hier die Fixierung der Radioisotope an Beton.

3. Mittels Ionenaustauschern. Diese Methode eignet sich besonders für die Konzentrierung von radioaktiven Ionen aus sehr verdünnten, chemikalienarmen Abwässern. Sowohl organische als auch anorganische Ionenaustauschermedien sind gebräuchlich. Diese sind im erschöpften Zustand hoch radioaktiv und müssen weiter behandelt werden, z. B. Regenerierung,

Neutralisation der Regenerierabwässer und Behandlung dieser nach der Methode (1) oder (2), Fixierung der Konzentrate an Beton usw. Anorganische Ionenaustauscher, wie z. B. Kaoline oder Tone, Vermikulite (Muscovit-Glimmer) usw. werden nicht regeneriert, sondern man brennt aus ihnen Steine und lagert diese.

4. Mittels Verbrennung. Brennbare radioaktive Abfälle werden in Spezialverbrennungsanlagen mit abgeschlossenem Gassystem verbrannt (incineriert). Die Asche wird mit Zement zu Beton angerührt und gelagert. [22]

engl.: waste treatment (volume reduction)

franz.: traitement des déchets (par reduction de volume)

Lit.: s. Abfall, radioaktiver, ferner K. G. Seedhouse, J. Monahan, K. W. Pearce, L. Wallis, „The Removal of Fission Products from Solution with Precipitation-Column-Treatment", Bericht AERE E.S./R 2089.

Abfallkorrektur berücksichtigt den durch den zeitlichen Abfall der radioaktiven Strahlung bedingten Aktivitätsverlust radioaktiver Präparate bei *radiometrischen Messungen. [16]

engl.: compensation of radioactive decay

franz.: compensation de décroissance exponentielle

Abfall-Lagerung muß in strahlensicheren, wasserdichten und hinreichend dimensionierten Behältern durchgeführt werden. Ein Austreten radioaktiver Stoffe in das Grundwasser muß vermieden werden. Die Gefäße muß man auf ihre Dichtigkeit hin untersuchen und kontrollieren. Stark radioaktive Abfälle werden, weil sie Wärme entwickeln, gekühlt. Ausfall der Kühlung führt zur Zerstörung der Behälter (Schmelzen). Die Frage der Wärmeabführung ist insbesondere bei der Lagerung radioaktiver Abfälle in Bergwerken ein noch nicht befriedigend gelöstes Problem (Wärmestau). Die Baumaterialien der Lagerbunker müssen sehr alterungsbeständig sein und unter der Einwirkung radioaktiver Strahlung keine Zerstörung erleiden. Da man bei der Langzeitlagerung radioaktiver Stoffe mit völlig neuen Zeitdimensionen rechnen muß, kann man auf eine Erfahrung diesbezüglich nicht zurückgreifen. Man verwendet meistens Blei- oder Edelstahlgefäße, die von dicken Betonwänden umschlossen sind. Die

Behälter müssen Zeiträume bis zu 600 Jahren überdauern. Die Behälter werden in verlassenen Bergwerken oder in strahlensicheren, wasserdichten Betonbunkern gelagert oder in Gräben der Ozeane versenkt (englischer Brauch). Betonbunker werden insbesonders für die Lagerung von kurzlebigen Isotopen benutzt, deren Aktivität in längstens einigen Jahren so weit abklingt, daß man sie wie gewöhnlichen Abfall behandeln kann. [22]

engl.: waste storage, burial ground

franz.: possibilité d'ensevelissement, p. d'enterrement, stockage des déchets

Lit.: s. Abfall, radioaktiver.

Abfallstrom, s. Kaskade.

engl.: waste *franz.: déchets, résidu*

Abgase, radioaktive, sind die beim Betrieb von Reaktoren (Kühlgase) und bei der chemischen Auflösung neutronenbestrahlter Brennstoffelemente in Kernbrennstoffaufbereitungsanlagen freiwerdenden flüchtigen Stoffe. Die A. können neben den echten Gasen Ar, Kr, Xe auch feinste, in der Luft verteilte (gelöste) Feststoffe (Aerosole) enthalten.

Abgase aus Aufbereitungsanlagen und aus radiochemischen Laboratorien, heißen Zellen usw. müssen wie die Kühlgase von Reaktoren sehr sorgfältig gereinigt werden. Gasförmige radioaktive Bestandteile von Argon, Xenon und Krypton kann man mit heutigen Mitteln in technischem Ausmaß nur unvollkommen von der übrigen Abluft trennen. Daher bläst man diese nach Verdünnung mit großen inaktiven Luftvolumina in die Atmosphäre ab. Durch entsprechend hohe Schornsteine erreicht man genügende Verdünnungen. Im Prinzip ist eine Trennung radioaktiver Abgase quantitativ möglich. Man benutzt dazu tiefgekühlte Aktivkohle- oder Kieselgurfilter. Das Verfahren ist jedoch sehr teuer. Daher beschränkt sich die Reinigung der Abgase aus Aufbereitungsanlagen in den meisten Fällen auf eine Filtration der Abgase mittels Aerosolfiltern und einer Entfernung von Jod mittels Silbernitrat-Filter (s. Filter, absolute). Die Wirksamkeit der Filter muß 99,95 bis 99,99 % betragen. Chemische Reinigungsmethoden liegen den Silber-

nitrat-Filterbetten (s. Jod, radioaktives) sowie der kaustischen Gaswäsche (s. Sichten) zugrunde. Physikalische Methoden werden bei der Naßwäsche, der elektrostatischen Abscheidung, der Sandfiltration und dem Fiberglasfilter benutzt. [22]

engl.: radioactive off-gases, radioactive exhaust

franz.: gaz radioactifs, fumées radioactives

Lit.: W. C. Schmidt, Hanford Atomic Products Operation, HW 49 549.

Abklingbehälter, s. Nachtrag.

Abklingraum, Raum in einem *Isotopenlaboratorium zur zeitweiligen Abstellung radioaktiv verseuchter Substanzen und Geräte, deren Verseuchungsgrad durch den Abfall der radioaktiven Strahlung während der Abstellung auf einen unschädlichen oder nicht mehr störenden Wert absinkt. [16]

engl.: decontamination room

franz.: local de décontamination, chambre de d.

Abklingzeit ist die Lagerzeit für radioaktive Stoffe, innerhalb derer ihre Radioaktivität bis zu einer definierten (vorgegebenen) Grenze abgefallen (abgeklungen) ist. [22]

engl.: decay period

franz.: temps de désintégration, t. de décontamination

Abkühlen. Allgemeiner Ausdruck, um zu beschreiben, daß ein großer Teil der Radioaktivität eines Materials an einem strahlensicheren Ort abklingen soll. [18]

engl.: cooling *franz.: désactivation*

Ablenkung, elektrische. Strahlen aus bewegten, elektrisch geladenen Teilchen werden durch ein elektrisches Feld aus ihrer Richtung abgelenkt, wenn das Feld eine Komponente quer zur Strahlrichtung besitzt. Ist v die Geschwindigkeit der Strahlteilchen, m ihre Masse, e ihre Ladung und wirkt auf eine Länge l des Strahls eine konstante, homogene elektrische Feldstärke E quer zum Strahl, so beschreiben die Teilchen im Feld eine Parabel genau wie ein waagrecht geworfener Stein im Schwerefeld der Erde. Da die Teilchen einer Kraft $e\,E$ unterliegen, erleiden sie eine Beschleunigung $b = e\,E/m$ und haben nach der Zeit $t = l/v$, welche sie im Raume des elektrischen Feldes verbrin-

gen, eine Quergeschwindigkeit $b\,t = E\,l\,e/m\,v$ erreicht. Ihr Verhältnis zur Längsgeschwindigkeit v liefert den Tangens des Ablenkungswinkels α:

$$\tan \alpha = E\,l\,\frac{e}{m\,v^2}\,.$$

Die e. A. ist also um so stärker, je langsamer die Teilchen sind und je größer ihre spezifische Ladung e/m ist.

Die e. A. dient einerseits zusammen mit der magnetischen A. dazu, Geschwindigkeit und spezifische Ladung von Strahlteilchen im einzelnen zu bestimmen, andererseits in der Braunschen Röhre und ähnlichen Elektronengeräten zur zeitlich veränderlichen A. des Elektronenstrahls. [1]

engl.: electric deflection
franz.: déviation électrique

Ablenkung, magnetische. Strahlen aus bewegten, elektrisch geladenen Teilchen erfahren auch in einem magnetischen Feld, das eine Komponente quer zur Strahlrichtung hat, eine A., und zwar nicht in Richtung des Feldes, sondern senkrecht sowohl zur Feld- wie zur Strahlrichtung. In einem homogenen Magnetfeld der Induktion B beschreiben die Teilchen von der Masse m, der Ladung e und der Geschwindigkeit v, da die Kraft konstant und immer senkrecht zur augenblicklichen Bewegungsrichtung gerichtet ist, eine Kreisbahn, für deren Radius R gilt:

$$\frac{1}{R} = B \cdot \frac{e}{m\,v}\,.$$

Auch magnetisch werden also die Teilchen um so stärker (mit um so kleinerem Bahn-Krümmungsradius R) abgelenkt, je langsamer sie sind und je größer ihre spezifische Ladung e/m ist. Da jedoch die m. A. mit $e/m\,v$ geht, die elektrische A. dagegen mit $e/m\,v^2$, so läßt sich durch Kombination beider e/m und v einzeln bestimmen.

Die m. A. wird in der Braunschen Röhre (dort allerdings mehr die elektrische A.) und vor allem im Zyklotron verwendet, sowie zur Geschwindigkeits-

bestimmung sehr energiereicher Teilchen aus der Krümmung der Spuren in der Nebelkammer. [1]
engl.: magnetic deflection
franz.: déviation magnétique

Ablösearbeit, s. Abtrennarbeit.

Abschalten, Verminderung der Leistung eines Reaktors durch besondere *Steuerorgane. Man unterscheidet nach Funktion und Art der Steuerung zwischen den schnellen Abschaltungen *Schnellschluß (a) und *Notabschalten (b) und den langsamen Abschaltungen *Rücklauf (c) und *Rückstellen (d).
Dabei versteht man unter a) alle normalen Schnellabschaltungen bei momentanen Gefahren, die eine sofortige Leistungsverminderung erfordern, unter b) die äußersten Maßnahmen zum Schutz gegen Katastrophen bei Versagen von Fall a). c) ist die einfache Abschaltung durch gleichmäßiges Einfahren der *Trimmorgane, d) die definierte Leistungsverminderung auf einen ungefährlichen Wert mittels *Tiefstellen des Sollwerts der automatischen Neutronenflußregelung.
Alle Abschaltungen der Leistung werden letzten Endes durch die Einstellung genügend großer negativer Reaktivitäten erzielt. Als spezielle Steuerorgane dienen dabei im Fall a) besondere *Abschaltorgane, die auf Befehl mit möglichst hoher Geschwindigkeit, jedoch reversibel, betätigt werden. Die *Abschaltzeit beträgt etwa 0,1 ... 10 s; im Falle b) sind irreversible Vorrichtungen zum schnellen Vergiften der Spaltzone mit starken Absorbern (Pulver, Salzlösungen oder Kugeln mit Bor- oder Cadmiumgehalt) oder zum schnellen mechanischen Abbau von Teilen der Spalt- oder Reflektorzone (z. B. Schmelzschichten zwischen Teilen von Uranstäben usw.) vorgesehen. Für die Steuerung im Betrieb gemäß c) werden die *Trimmorgane zur *Grobsteuerung der Reaktivität auf Befehl solange gleichmäßig eingefahren, bis ein ausdrücklicher Gegenbefehl kommt. Eine bestimmte Leistungsverminderung d) wird durch die Feinregelungsorgane bewirkt, die als Stellglieder im *Leistungsregelkreis automatisch die Steuerbewegungen durchführen, welche zur Ein-

stellung der verminderten Solleistung erforderlich sind.
Für die Leistungsänderung nach dem A. ist es entscheidend, daß die Strahlungsleistung der Spaltprodukte, die sogenannte Nachwärme, langsamer abklingt als die zum Neutronenfluß proportionale Kernspaltungsleistung. Der Zeitverlauf des Neutronenflusses hängt über die kinetischen Neutronen- und Wärmegleichungen in komplizierter Weise von der Vorgeschichte, insbesondere vom *Steuerverlauf ab. Bei schnellen Abschaltungen mit einem Reaktivitätshub ϱ nach längerem stationären Betrieb kann man näherungsweise ansetzen, daß zunächst, innerhalb der ersten Sekunde, ein Sprung des Neutronenflusses auf den Bruchteil $\beta/(\beta - \delta k)$ erfolgt, an den sich ein Abfall

$$\sum_{i=1}^{6} \frac{\beta_i}{\beta} \cdot \mathrm{e}^{-\lambda i t}$$

proportional zur relativen Konzentration der Quellen der verzögerten Neutronen anschließt. Die übliche Abschaltung mit $|\delta k| \geqq 3\,\%$ bewirkt deshalb bei natürlichem Uran ($\beta = 7{,}5 \cdot 10^{-3}$) zunächst einen Sprung auf $\leqq 20\,\%$ der Ausgangsleistung und danach innerhalb von 60 s einen Abfall auf $\leqq 2{,}0\,\%$. Man beachte, daß auch die Photoneutronen als Folge der Gammastrahlung der Spaltprodukte zu den verzögerten Neutronen hinzugezählt werden müssen, wodurch der Neutronenfluß in Schwerwasserreaktoren erst nach Wochen unter 10^{-7} absinkt. Die Strahlungsleistung der Spaltprodukte ist über die Differentialgleichungen zwischen Erzeugung und Zerfall ebenfalls mit der Vorgeschichte des Neutronenflusses und mit dessen Steuerverlauf gekoppelt. Generelle Aussagen lassen sich daher nur für Zeiten t nach dem A. machen, die groß gegen die Dauer der vorausgehenden Störungen und klein gegen die vorausgehende Betriebszeit t_0 bei annähernd konstanter Leistung Q_0 sind. Aus der Formel für die Nachwärme der Spaltprodukte ergibt sich dann 1 Minute nach dem Abschalten noch etwa 2,3 % von Q_0 gegenüber nur 2 % für die Spaltungsleistung. Knapp formuliert fällt demnach die Leistung nach Schnellabschaltungen zunächst in maximal 60 s bis auf

etwa 5 % des Ausgangswertes ab, um dann praktisch nur noch von der Spaltproduktstrahlung bestimmt zu werden. Der weitere Abfall ist deshalb außerordentlich langsam und erreicht nach 1 h etwa 1 %, nach 1 d etwa 0,5 % und nach 1 Monat etwa 0,1 %. Auch nach vollständigen Abschaltungen des Neutronenflusses muß deshalb unter allen Umständen eine angemessene *Notkühlung aufrechterhalten werden.

Langsame Abschaltungen mit konstanter *Trimmgeschwindigkeit $|\dot{\varrho}_S| \leqq 2 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{s}^{-1}$ ergeben ohne Temperaturstabilisierung in den drei obersten Dekaden angenähert exponentielle Neutronenflußabfälle mit Zeitkonstanten, für die grob empirisch

$$|\tau_p| = 0{,}3 \cdot (\dot{\varrho})^{-0{,}5}$$

(Cox u. Walker) gilt. Damit bei Temperaturverzögerungen mit einer Zeitkonstante τ_T während des A.s die *Temperaturstabilisierung bestehen bleibt und damit eine zur Trimmung proportionale Leistungsverminderung eintritt, muß $|\tau_p| > |\tau_T|$ und $|\varrho_T| < |\dot{\varrho}_S| \cdot |\tau_T|$ erfüllt sein (ϱ_T momentaner Temperatureffekt). In der Praxis sind beide Bedingungen nur für sehr kleine $\dot{\varrho}_S$ und große ϱ_T erfüllbar, so daß günstigstenfalls nur ein kleiner Teil der Leistungsverminderung mit Temperaturstabilisierung erfolgt. Der anschließende exponentielle Abfall hat zunächst Zeitkonstanten von etwa 100 s und geht dann beim Neutronenfluß in den Abfall der Photoneutronen und bei der Leistung in den Abfall der Spaltproduktstrahlung über. [9]

engl.: shut-down

franz.: arrêter, déclencher

Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw Hill, New York, 1955. – S. Glasstone, Principles of Nuclear Reactor Engineering, van Nostrand, New York, 1955. – R. Stephenson, Introduction to Nuclear Engineering, McGraw Hill, New York, 1958. – R. I. Cox, I. Walker, Proc. of the Inst. of El. Eng., Vol. 103, B, 577 (1956).

Abschalthub ist diejenige Strecke, die ein abschaltendes Steuerorgan, z. B. ein Absorberstab, unter Beeinflussung der zu steuernden Größe (z. B. Neutronenfluß) durchsetzt, s. Abschaltreaktivität. [7]

franz.: course de déclenchement

Abschaltkupplung, fernauslösbare, schnellarbeitende, im allgemeinen elektromechanische Kupplung

zwischen dem Transportmechanismus und dem eigentlichen *Abschaltorgan einer Abschalteinrichtung für den Schnellschluß. Durch die A. kann über ein geeignetes Schaltsignal (pneumatisch, hydraulisch, elektrisch) jederzeit ein Schnellschluß ausgelöst werden. In den meisten Fällen handelt es sich um elektromechanische Haftkupplungen, die aus Sicherheitsgründen so geschaltet werden, daß sie im stromlosen Zustand zum Abschalten führen. Die wichtigsten Ausführungsformen sind a) direkte Tragemagnete für Absorberteile oder damit verbundene Hebelsysteme (z. B. Absorberarm mit Hebelantrieb), b) indirekte elektromechanische Sperrklinken, durch die eine wesentlich größere Kupplungskraft gesteuert werden kann, c) elektromechanische Drehkupplungen (z. B. bei Dreharmen mit seitlichen Antriebsachsen oder Absorberstäben mit Seiltrommelantrieb), d) elektromechanische Schnellventile für das Ablassen von Sperrflüssigkeiten oder Gasen (z. B. bei schwimmenden Absorberstäben oder Schnellablaß des Moderators), e) nicht selbsthemmende elektrische Stellantriebe (z. B. lineare Reluktanzmotoren).

Von den A. muß verlangt werden, daß sie sicher gegen elektromagnetisches (Remanenzeffekt) oder mechanisches Haften (Reibung, Korrosion) sind und eine Entregungszeit haben, die kurz gegen die Abschaltverzögerung beim eigentlichen Abschaltverlauf und während der Meßdauer der Signale ist. In der Praxis sind Verzögerungszeiten zwischen 0,01 s und 0,1 s üblich. [9]

engl.: scram clutch

franz.: embrayage de déclenchement

Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw Hill, New York, 1955. – G. E. Lockett, Proc. of the Inst. of El. Eng., Vol. 103, B, 597 (1956).

Abschaltleistung bzw. **-pegel,** Zahlwert der Leistung bzw. des dazu proportionalen Neutronenflusses, bei dessen Überschreitung das *Grenzwertgerät im zugehörigen Meßkanal eine automatische Abschaltung des Reaktors auslöst. Die A. muß wegen der unvermeidlichen Leistungsschwankungen (s. Leistungsrauschen) und mit Rücksicht auf die Toleranzen der Meß- und Grenzwertgeräte so gewählt werden, daß ein genügender Abstand (einige Prozent) sowohl a) gegen-

über der kleineren Vollastleistung als auch b) gegenüber der größeren Grenzleistung eingehalten wird.
Die Größe der notwendigen Toleranzdifferenzen richtet sich bei a) vor allem nach den im Normalbetrieb zu erwartenden Leistungsschwankungen und hängt deshalb wesentlich von der Güte der Regelung ab. Der Abstand b) wird dagegen vorwiegend von Sicherheitserwägungen bestimmt, d. h. von der maximalen Dauer und Größe evtl. Leistungs- und Temperaturüberschläge während d. Abschaltverzögerung. S. a. Grenzperiode. [9]
engl.: scram power
franz.: valeur de déclenchement, puissance critique de d.

Abschaltorgane, allgemein: Einrichtungen zum *Abschalten der Reaktorleistung bzw. des Neutronenflusses durch ausreichende Verminderung der Reaktivität.
Speziell: Schnell-A. zur Durchführung des *Schnellschlusses, d. h. einer möglichst schnellen und vollständigen Abschaltung bei Gefahr.
Die schnellsten Wirkungen lassen sich mit *Absorberelementen erzielen, die Abschaltzeiten bis unter 0,1 s geben. Dabei sind Absorberarme mit Drehkupplungen wegen der geringeren Tätigkeit und des Wegfalls besonderer *Vorlaufzeiten zum erneuten Laden günstiger als axialbewegte Absorberstäbe oder -platten.
*Moderatorspiegeländerungen sind wesentlich langsamer und erfordern außerordentlich große Ablaufquerschnitte um auch nur für sog. langsame Schnellschlüsse zu genügen (Abschaltzeit 2 ... 10 s). Besonders günstig sind gasdruckgesteuerte Überlaufrinnen am unt. Ende d. Moderatorraumes, mit denen schnelle Spiegelabsenkungen für den *Schnellablaß als auch genaue Einstellungen zum *Trimmen möglich sind.
Druckänderungen in der Dampf- oder Gasatmosphäre oberhalb des Kühlmittels oder Moderators haben im allgemeinen nur einen kleinen Reaktivitätshub und sind nicht immer eindeutig im Vorzeichen. Sie kommen deshalb höchstens für zusätzliche Trimmungen und Abschaltungen in Frage. [9]
engl.: scram mechanism
franz.: organes de déclenchement
Lit.: s. Abschalten.

Abschaltpegel, s. Abschaltleistung.

Abschaltreaktivität, Betrag der effektiven negativen Reaktivität bei vollständigem Hub der Abschaltorgane, z. B. vollständig eingefahrenen Abschaltstäben.
Der Wert ist normalerweise direkt nach dem *Schnellschluß am größten und nimmt später durch den Wegfall der Temperatur- und Vergiftungseffekte unter Umständen erheblich ab. Der verbleibende Mindest-Wert variiert nach Typ und Verwendungszweck des Reaktors etwa zwischen $0{,}5 \cdot 10^{-2}$ und $5 \cdot 10^{-2}$. [9]
engl.: shut-down reactivity
franz.: réactivité résiduelle

Abschaltstäbe, Stäbe oder Rohre aus neutronenabsorbierendem Material (Bor-, Hafnium- oder Cadmiumgehalt) ähnlich oder identisch den *Regelstäben, welche im Notfall schnell in den Reaktorkern eingebracht werden, um die Kettenreaktion zu unterbrechen (s. Abschalten). [8]
engl.: shut-off rods, auch *safety rods, scram rods*
franz.: barres de sécurité, barres d'arrêt

Abschaltverlauf, zeitlicher Ablauf der Neutronenflußänderung während einer Abschaltung, insbesondere während eines *Schnellschlusses. Die genaue Form des A. hängt vom Verlauf der Reaktivitätsverminderung während des Abschaltens ab, mit der über die kinetischen Neutronengleichungen jeweils eine ganz bestimmte Neutronenflußänderung verknüpft ist. Zur ersten Abschätzung kann man die Fallbewegung der Abschaltorgane durch eine geeignete Kombination aus einer anfänglichen Totzeit mit einem anschließenden Reaktivitätssprung, bzw. konstanter Reaktivitätsgeschwindigkeit ersetzen, für die die Flußänderungen leicht zu bestimmen sind.
Der A. läßt sich in folgende Bereiche einteilen: a) den Anlaufbereich der Steuerbewegung, b) den prompten Neutronenflußsprung, c) den Abfall der verzögerten Neutronen. Bei a) sind die Reaktivitätsänderungen so klein, daß die Neutronenflußänderungen näherungsweise mit den Methoden der linearen Regelungstheorie, z. B. mit dem Frequenzgang des Reaktors, berechnet werden können. Die Neutronenflußänderungen sind dabei höchstens

etwa β^{-1}mal größer als die Reaktivitätsänderungen. Im Bereich b) werden die Reaktivitätsverminderungen so groß und schnell, daß nur die ursprünglichen Neutronengleichungen angewandt werden können, wobei jedoch wegen der hohen Geschwindigkeit die Konzentration der verzögerten Neutronenquellen in erster Näherung konstant angenommen werden darf. Der Neutronenfluß Φ folgt deshalb mit einer Verzögerungszeitkonstanten von etwa $l/\beta = 0{,}13$ s der jeweiligen Quellverstärkung gemäß $\Phi/\Phi_0 = \beta/(1-k)$, bis k den Endwert erreicht hat. Bei c) schließt sich an den Endwert des schnellen Übergangs von b) ein langsamer Neutronenflußabfall entsprechend dem radioaktiven Zerfall der Konzentration C_i der verzögerten Neutronenmutterkerne an. Zahlenmäßig folgt für diese weitere Abnahme aus $\Sigma(\beta_i/\beta)\,e^{-\lambda_i t}$ grob etwa 50 % nach 5 s, 10 % nach 1 min, 5 % nach 2 min und 1 % nach 4 min.

Man beachte, daß die Wärmeleistung wegen der radioaktiven *Nachwärme der Spaltprodukte insgesamt zunächst auf nur etwa 5 % abfällt. Für die Leistungsabschaltung bis auf diesen Wert ergeben sich in der Praxis *Abschaltzeiten zwischen 0,1 und 0,5 s. [9]

engl.: shut-down development

franz.: comportement au déclenchement

Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw Hill, New York, 1955. – R. I. Cox, I. Walker, Proc. of the Inst. of El. Eng., Vol. 103, B, 577 (1956).

Abschaltverzögerung, Gesamtzeit zwischen dem Überschreiten des Sollwerts durch die physikalische Kenngröße (z. B. Temperatur, Leistung, Periode, Kühlgeschwindigkeit usw.) und der vom *Schnellschluß bewirkten Leistungsverminderung bis auf den Wert der langsam abfallenden *Strahlungsleistung der Spaltprodukte (ca. 5 % der Normalleistung).

Die A. umfaßt normalerweise folgende Verzögerungsanteile: Ansprechzeit des Meßfühlers, z. B. Erwärmung eines Thermometers (0,01 ... 10 s); Schaltzeit des *Signalrelais, einschließlich der Laufzeit in evtl. Verstärkern (0,01 ... 0,1 s); Entmagnetisierung der *Abschaltkupplung im *Abschaltorgan (0,01 ... 0,2 s); Zeitbedarf für die erste Reaktivitätsverminderung um ca. 2 ... 3 % (0,1 ... 0,5 s). Der Wert für die gesamte

A. liegt deshalb zwischen ungefähr 0,2 s (bei Neutronenflußschnellschluß und sehr schnellen Abschaltorganen) und 20 s (bei Wärmeleistungsschnellschluß und Schnellablaß des Moderatorspiegels). [9]

engl.: shut-down lag, scram delay

franz.: délai de déclenchement, retard au déclenchement

Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw Hill, New York, 1955.

Abschaltzeit, allgemein: Zeit zwischen dem Beginn der Abschaltsteuerung und der Leistungsverminderung bis zur Strahlungsleistung der Spaltprodukte,
speziell: Zeitbedarf für die eigentliche *Abschaltung bei einem *Schnellschluß.
Nach unten hin ergibt sich mit Rücksicht auf die hohen Beschleunigungen und die Festigkeit der Absorberelemente ein praktischer Grenzwert von ungefähr 0,1 s, während die obere Grenze nur von operativen Überlegungen bestimmt wird. Weitere Verkürzung der A. mittels hoher Anfangsbeschleunigungen b über eine kurze Strecke h (im Vergleich zum gesamten Abschalthub H) lassen sich nur noch mit sehr großen Werten b erreichen, da die A. ab etwa $b\,h = 0{,}1\,g\,H$ praktisch proportional zu $b\,h^{-0{,}5}$ (statt $b\,h^{-1}$ im Anfang) abnimmt. Am günstigsten sind dabei leichte Hohlkörper mit großen, vollständig absorbierenden Oberflächen und großer Stoßfestigkeit (wie die Abschaltstäbe), am ungünstigsten große Massen mit geringer Absorption (oder vergleichbarer Wirkung, z. B. Moderatorschnellablaß). [9]

engl.: shut-down time

franz.: temps de déclenchement, temps de coupure

Lit.: S. Glasstone, Principles of Nuclear Reactor Engineering, D. van Nostrand Comp., New York, 1955. – R. I. Cox, I. Walker, Proc. of the Inst. of El. Eng., Vol. 103 B, 577, 1956.

Abscheidung, elektrolytische, wird allgemein zur Abscheidung von Ionen aus Lösungen angewandt. In der Kernbrennstoffaufbereitung dient der Prozeß zur Entaktivierung (Entseuchung) radioaktiver Lösungen. Die e. A. ist auf zwei Weisen zu realisieren.

1. Durch Anlegen einer äußeren elektromotorischen Kraft (EMK) an zwei in die Elektrolytlösung ein-

tauchende Elektroden, deren Elektrodenraum durch semipermeable Membranen vom übrigen Elektrolytraum abgetrennt sein kann, werden die Kationen entweder an der Kathode abgeschieden oder zur Wasserstoffentwicklung Anlaß geben und sich selber im Kathodenraum innerhalb des durch die semipermeable Membran abgeteilten Raumes akkumulieren; die Anionen werden entweder als Gase an der Anode abgeschieden oder zur Sauerstoffentwicklung an der Anode Anlaß geben und sich selber im Anodenraum akkumulieren, während im Raum zwischen den Elektroden, von diesem durch die semipermeable Wand getrennt, eine Verarmung an Ionen eintritt. Da zur e. A. bestimmter Ionen aus Lösungen diskrete Spannungen (EMK) notwendig sind, kann man durch eine entsprechende Wahl der angelegten äußeren Spannung eine partielle Abscheidung erreichen.
2. Elektropositive Metalle vermögen Ionen weniger elektropositiver, edlerer Metalle aus der Lösung zu verdrängen, während sie selber als Ionen in Lösung gehen (Spannungsreihe der Metalle). [22]
engl.: electro-deposition
franz.: séparation électrolytique

Abscheidung, elektrostatische, dient zur Abscheidung von festen Staubteilchen aus Luft oder Gasen. Die staubhaltige Luft passiert eine Vorkammer, in der die Luft ionisiert und die Staubteilchen elektrisch aufgeladen werden. Dieses geschieht mittels einer kontinuierlich verlaufenden Funkenentladung oder mittels starker radioaktiver Strahlenquellen. Anschließend leitet man die Luft durch den Luftspalt eines stetig aufgeladenen Plattenkondensators spezieller Bauart. Hier werden die elektrisch aufgeladenen Staubteilchen entsprechend ihrer elektrischen Ladung von den entgegengesetzt aufgeladenen Kondensatorplatten angezogen und auf den Platten abgelagert, von wo sie automatisch entfernt werden. [22]
engl.: electrostatic deposition
franz.: séparation électrostatique

Abschirmdicke ist diejenige Schichtdicke eines Stoffes, die nötig ist, um eine Strahlung bestimmter Energie und Intensität bei einer vorgegebenen Anordnung

auf die maximal zulässige Dosis zu reduzieren. Geringe Schichtdicken sind bei α- und β-Strahlen erforderlich, größere Schichtdicken dagegen bei γ- und n-Strahlen. [26]
engl.: shielding thickness
franz.: épaisseur du blindage

Abschirmkammer, Behälter, dessen Inneres von Höhenstrahlung und Raumstrahlung möglichst abgeschirmt ist (s. a. Meßkammer). [16]
engl.: shielding chamber
franz.: chambre blindée, ch. écran

Abschirmstoffe sind Stoffe, die sich besonders gut zur Strahlenabschirmung eignen. Für Neutronenabschirmung sind Stoffe mit hohem Wassergehalt am günstigsten. Gewöhnliches Wasser ist daher ein guter und zugleich billiger Schutz. Viele organische Verbindungen und einige Metallhydride ergeben dünnere Schichtdicken zur Abschirmung als Wasser für dieselbe Schwächungsrate, jedoch sind diese Materialien oft sehr wenig strahlenresistent. Günstige wasserstoffhaltige Substanzen sind Holz, Gummi, Erdöle und deren Produkte sowie Hydride und plastische Materialien. Ebenso haben leichte Elemente, wie Li und Be, gute Abschirmeigenschaften. Für die Absorption von thermischen Neutronen bietet sich *Cadmium oder *Bor (evtl. auch Hafnium) an. Während Bor kaum aktiviert wird (keine nennenswerte sekundäre γ-Strahlung!) bilden sich beim Cadmium hochaktive Isotope. Jedoch läßt sich Cadmium leicht und gut verarbeiten, während alle thermisch stabilen Borverbindungen, bzw. das Element selbst, inerte Pulver darstellen, die sich nur schwierig in die gewünschte Form bringen lassen. Man wendet Bor deshalb hauptsächlich als *Boral oder als Borstahl an. Die Abschirmung der Gamma-Strahlen erfolgt durchweg mit Stoffen hoher Ordnungszahl und großer Dichte, wie Blei, Gold, Wolfram (auch Uran und Thorium sind gute A.), Eisen, Kupfer, Nickel, Chrom sowie deren Legierungen. In erster Linie ist hohe Dichte anzustreben, da der Massenabsorptionskoeffizient für γ-Strahlung aus Reaktoren ($E_\gamma \approx 3$ MeV) für den oberen Energiebereich von der Ordnungszahl unabhängig ist,

s. Seite 37. – Für α- und β - S t r a h l e n gilt dasselbe wie für γ's.

A. f ü r R e a k t o r e n müssen beide Strahlenarten, γ und n, abschirmen. Man benötigt also einen Stoff, der viel leichte Atome enthält, möglichst hohe Dichte hat und möglichst homogen ist. Daher wendet man meistens *Schwerbeton an. Zusätzlich tritt jetzt die Frage der Unterdrückung der Einfang-γ-Strahlung auf. Dazu boriert man die A. wie z. B. beim *Colemanit-Beton oder man nimmt Materialien, wie Boral und Boraxal. S. a. Baryt- und Baryt-Limonit-Beton, Borfritt-Baryt-Beton, Lumnit-Colemanit-Beton, MO-Beton, Schwerbeton.

A. für M e ß k a m m e r n richten sich hauptsächlich gegen Höhenstrahlung und Gammastrahlung der Umgebung. Deshalb werden Stoffe mit hoher Ordnungszahl, wie Pb, Hg oder Wo, bevorzugt. A. für solche Kammern müssen selbst radioaktivitätsfrei sein. Aus diesem Grunde wird altes abgelagertes Blei, in dem die bei der Verhüttung nicht abgetrennten natürlich radioaktiven Substanzen größtenteils abgeklungen sind, neu verhüttetem Blei vorgezogen. Diese Schwierigkeit tritt bei Fe, Hg und Wo nicht auf. [16, 20, 26]

engl.: shield materials

franz.: matériaux de blindage, m. de protection, m. d'écran

Abschirmung, Schutzmantel für radioaktive Anlagen und Konstruktionsteile, um deren Strahlung den Erfordernissen entsprechend abzuschirmen. Bei Gammastrahlung ist die Wirksamkeit in erster Linie vom Gewicht abhängig, während bei Neutronenstrahlung der Absorptions- und Streuquerschnitt sowie das Atomgewicht des Materials maßgeblich sind. Da bei Reaktoren Spektren beider Strahlungsarten auftreten und in der A. Sekundärstrahlungen (Bremsstrahlung) und eine beträchtliche Menge Wärme, in die die gesamte Strahlenenergie verwandelt wird, erzeugt werden, ist die Berechnung und Konstruktion der A. ein ziemlich kompliziertes Gebiet. Je nach dem, ob die erzeugte Wärme durch ein Kühlsystem abgeführt werden muß

oder nicht, unterscheidet man den thermischen und den biologischen *Schild. [8]
engl.: shield
franz.: écran de protection (labor) blindage, bouclier de protection (pile)

Lit.: Reactor Shielding Design Manual, Th. Rockwell III, Van Nostrand Co., New York. – Radiation Shieldding, B. T. Price, C. C. Horton, K. T. Spinney, Pergamon Press London.

Abschirmung, atomare. Im Atombau versteht man darunter die Tatsache, daß auf die äußeren Elektronen nicht das volle elektrische Feld der Kernladung $Z e$ wirkt, sondern daß dieses durch Vorhandensein der inneren Elektronen geschwächt, abgeschirmt ist. Besonders klar tritt die A. hervor, wenn, wie bei den Alkaliatomen, ein einziges, weit außen kreisendes Elektron vorhanden ist. Dieses Elektron bewegt sich dann im Feld des Kerns und der $(Z - 1)$ übrigen Elektronen, das näherungsweise durch das Feld einer verminderten, „effektiven" Kernladung Z_{eff} ersetzt werden kann. Die Differenz $Z - Z_{eff}$, die ein Maß für die A. darstellt, heißt Abschirmungszahl. [1]
engl.: screening *franz.: effet d'écran*

Abschirmungswärme, entsteht primär durch die Umwandlung der kinetischen Energie der abzuschirmenden Strahlung und sekundär (bei thermischen Neutronen) durch die Sekundärstrahlung bei der Absorption von Neutronen. Wegen der A. sind in der Reaktorabschirmung besondere konstruktive Maßnahmen, z. B. Kühlung im sog. thermischen *Schild notwendig. [8]
engl.: heat generation in the shield
franz.: chaleur dissipée dans l'écran

Abschirmungszahl, s. Abschirmung, atomare.

Abschrecken, s. Nachtrag.

Absenkungsfaktor, s. Nachtrag.

Absorber nennt man jedes Stück Materie, das die Absorption irgend einer es durchsetzenden Strahlung bewirkt. Als A. für γ-Strahlen werden meist Stoffe von hohem Atomgewicht, vor allem Blei, verwendet, als A. für langsame Neutronen Stoffe, die einen großen Wirkungsquerschnitt für diese Neutronen haben, etwa Kadmium oder Bor, evtl. in Verbindungen. [1]
engl.: absorber
franz.: absorbeur

Absorber-(Dreh-)Arm, streifen- oder stabförmiges *Absorberelement, das um eine exzentrisch zum Reaktor liegende Querachse so gedreht werden kann, daß der Absorber verschieden tief in die Spaltzone eintaucht und dadurch die Reaktivität ändert.

Die zwei wichtigsten Ausführungsformen sind: a) A. mit von außerhalb der Spaltzone zugänglichen Drehachsen quer zu den Achsen der Brennstoffelemente, b) A. mit Antriebsgestänge in besonderen Kanälen parallel zu den Brennelementachsen. – Für a) spricht die völlige räumliche Trennung des A.-Antriebs von den Bedienungskanälen für den Brennstoff und die dadurch unter Umständen gebotene Einsparung an Deckeldicke und Vereinfachung der Konstruktionen, ferner der Wegfall eines besonderen *Vorlaufs für das erneute „Laden“ des Abschaltmechanismus bei *Trimmabschaltarmen, sofern Drehkupplungen benutzt werden. Nachteilig ist dagegen die umständliche Montage und besonders Demontage (bei radioaktiven Verseuchungen) und die eventuelle Notwendigkeit von Gleitdichtungen gegenüber teuerem Schwerwasser. – Ausführung b) kann demgegenüber so ausgebildet werden, daß der A. als Ganzes (wie Absorberstäbe) ein- und ausgebaut werden kann, nachdem gewisse Arretierungen gelöst worden sind. Gegenüber den Absorberstäben besteht der Vorteil, daß die Deckelhöhe nicht begrenzt wird, Faltenbälge zur Dichtung der wenig-bewegten Antriebsstangen genügen und der Einbau am Rande der Brennelemente möglich ist. Nachteilig ist hier vor allem die sehr hohe Präzisionsanforderung an die im oder nahe am Strahlungsfeld befindlichen Hebellager und die ebensolange *Vorlaufzeit zum neuen Laden des Abschaltmechanismus wie bei den Abschaltstäben. [9]

engl.: (absorber) signal arm

franz.: barres de pilotage (pivotantes)

Lit.: Reaktorbeschreibungen in Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. 2 u. 3, Genf, 1955.

Absorberelemente, zusammenfassende Bezeichnung für alle zu Steuerzwecken dienenden Absorber in Reaktoren. Man unterscheidet nach der Funktion: Trimm-, Regel- und Abschaltelemente; nach der Ausführungsform: Absorber-Stäbe, -Platten, -(Dreh-) Arme usw.

Alle A. müssen so ausgelegt werden, daß ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Stellung und Reaktivitätsänderung auftritt. Die Steuerwirkung kann dabei entweder als a) Änderung der makroskopischen Randbedingungen oder b) als Änderung der mittleren mikroskopischen Kenndaten der Reaktorstruktur aufgefaßt werden. Im allgemeinen empfiehlt sich die Berechnung nach a), da b) nur bei sehr vielen dicht verteilten A.n genügend genau ist. Die Wirkung einzelner A. ist in erster Näherung proportional zum mittleren Quadrat des ungestörten Neutronenflusses am Ort des A. (vor dem Einbringen). Da andererseits um jedes A. starke Verzerrungen des Neutronenflusses eintreten (bis mindestens eine *Diffusionslänge Abstand), können verschiedene A. sich je nach ihrer geometrischen Anordnung in ihrer Wirkung sowohl verstärken als auch abschwächen. Grob genähert ergeben sich besonders starke Effekte, wenn die A. im Mittel etwa 1 bis 2 effektive Diffusionslängen auseinander liegen. Dabei sind zugleich die einzelnen Steuerverläufe schon weitgehend entkoppelt. [9]

engl.: absorber devices

franz.: appareillage d'absorption

Lit.: s. Abschalten, ferner S. Glasstone und M. C. Edlund, Nuclear Reactor Theory, McMillan, London, 1953.

Absorbermaterial, s. Abschirmstoffe.

engl.: absorber material

franz.: matérial absorbant

Absorberstab, stab- oder röhrenförmiges *Absorberelement zur Steuerung der Reaktivität eines Reaktors. Der A. stellt die adäquate Absorberform für heterogene Reaktoren mit zylinderförmigen oder prismatischen Strukturen in der Spaltzone dar, denn dann ergibt sich: geringste Störung des heterogenen Gitters und dadurch besonders leichte Versetzbarkeit auf andere Positionen, großer *Steuerhub zwischen völligem Ein- und Ausfahren, bequeme Montagemöglichkeit durch einfaches, axiales Einschieben der Führungshülse und des Antriebs, Ausnutzbarkeit der Schwerkraft bei vertikalen *Abschaltstäben.

Die Nachteile dieser Konstruktion sind demgegenüber:

Dichtungsschwierigkeiten bei axialen Gleitdichtungen zwischen Antriebs- und Absorberteil,

großer Hub und damit entweder lange Zeiten oder starke Beschleunigungen bei Schnell-Abschaltstäben,

sehr gedrängte Konstruktionen bei allen Bauteilen wie Stoßdämpfer, Beschleunigungsfeder, Abschaltkupplung, Trimmantrieb, Stellungsmelder und Endschalter, Stromzuführungen etc.,

gegenseitige Behinderung von Absorberstäben und Brennelementen bei der Montage von der gleichen Reaktorseite her, für die sich meistens der obere Deckel empfiehlt,

Kühl- und Spülschwierigkeiten bei völlig gegen die Spaltzone abgedichteten Steuereinheiten (wegen der Aufheizung durch die Gammastrahlung starke Korrosion im Strahlungsfeld).

Die eigentlichen Absorbermaterialien wie Borverbindungen, Cadmium, Hafnium, Gadolinium u. a. müssen im allgemeinen aus mechanischen und chemischen Gründen in besondere Hülsen aus den üblichen Strukturmaterialien Aluminium, Edelstahl oder Zirkon eingeschlossen werden. Dabei ist wie bei den Brennstoffelementen wegen der Aufheizung im Strahlungsfeld ein guter Wärmekontakt zwischen beiden Materialien wichtig.

Für die Eichkurve der Eintauchtiefe z und Reaktivitätsverminderung $\varrho(z)$ ergibt sich bei allen näherungsweise kubischen Reaktoren immer ungefähr der gleiche cosinusförmige Verlauf gemäß

$$\varrho(z) = \varrho(H)\,\frac{1}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{z}{H}\,\pi\right)\right],$$

wobei H Dicke der effektiven *Spaltzone in z-Richtung ist. Diese Form ist weitgehend unabhängig von der speziellen Lage der z-Achse. Ähnliche Eichkurven ergeben sich auch für mehrere parallelbewegte Stäbe, solange die Abstände groß gegen die effektive Diffusionslänge in der Spaltzone sind. Bei extrem vielen Stäben nähert sich der Verlauf dem der Eichkurve für *Moderatorspiegelabsenkungen.

Für die Abhängigkeit der Gesamtwirkung eines Stabes

$\varrho(H)$ vom radialen Abstand r von der Reaktormitte ergibt sich ähnlich

$$\varrho(H, r) = \varrho(H, O) \cdot \frac{1}{2} [1 + \cos(r\pi/R)]$$

mit R als effektivem Radius der Spaltzone. [9]
engl.: control rod
franz.: barres de règlages
Lit.: s. Abschalten.

Absorption, die Verminderung der Intensität einer Strahlung beim Durchgang durch Materie. Je nach Art und Energie der Strahlung kann die A. über verschiedene Prozesse erfolgen:
1. α-Strahlen haben eine definierte Reichweite, die von der Energie abhängt. Nach Durchlaufen der Reichweite haben die Teilchen ihre gesamte Energie an die Materie abgegeben. Bis zum Ende der Reichweite bleibt also die Zahl der α-Teilchen konstant, während ihre Energie quasi kontinuierlich abnimmt. Der Energieverlust beruht auf Ionisierung der Materie.
2. β-Strahlen werden annähernd nach einem Exponentialgesetz absorbiert. Ist $I(x)$ die Intensität nach Durchlaufen der Schichtdicke x, $I(0)$ die auftreffende Intensität und μ der lineare Absorptionskoeffizient, so gilt

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu x}.$$

3. γ-Strahlen werden nach dem unter 2. genannten Absorptionsgesetz absorbiert. Je nach der Energie der γ-Strahlen kann die A. über drei Prozesse erfolgen, die nebeneinander ablaufen können:
*Photoeffekt, bei kleiner γ-Strahlenenergie und großer Kernladungszahl des Absorbers vorherrschend. Ein γ-Quant löst aus der Elektronenhülle der Atome des Absorbers ein Elektron, das seine totale Energie (vermindert um die *Abtrennarbeit) übernimmt.
*Comptoneffekt. Das γ-Quant trifft auf ein Elektron und überträgt diesem einen Teil seiner Energie. Dieser Effekt ist bei mittleren γ-Energien vorherrschend.
*Paarbildungseffekt. Ein γ-Quant mit hoher Energie ($>$ 1 MeV) kann im Kernfeld ein Elektron

und ein Positron bilden. Die kinetische Energie dieser gebildeten Teilchen ist gleich der Differenz der Energie des γ-Quants und der zur Erzeugung der Ruhemasse zweier Elektronen notwendigen Energie (1 MeV).

Die A. setzt sich additiv aus diesen drei Effekten zusammen, d. h. der lineare Absorptionskoeffizient ist die Summe der drei Absorptionskoeffizienten für Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt. S. Schwächungskoeffizient.

4. Thermische Neutronen werden entsprechend dem *Absorptionsquerschnitt der Materie durch Anlagerung an einen Atomkern absorbiert. Schnelle Neutronen können im Prinzip auch durch einen Anlagerungsprozeß absorbiert werden. Doch sind die Wirkungsquerschnitte durchweg sehr klein. Wichtig ist die Abbremsung durch elastische und unelastische Streuung auf thermische Energie und Absorption als thermisches Neutron (s. Neutronenbremsung). Unter Umständen wird bereits der Energieverlust durch Streuung als A. bezeichnet, dann nämlich, wenn man an einem konkreten Energieintervall der Neutronen interessiert ist, z. B. bei der *Gruppendiffusionsmethode. Es handelt sich dann nicht um eine echte A., sondern um ein Verschwinden von Teilchen in einem Energieintervall, was im Formalismus einer echten A. gleich kommt. – S. a. Einfang. [7, 17]

engl.: absorption

franz.: absorption

Absorptionsanalyse, Verfahren zur rohen Strahlungsanalyse oder zur Stoffanalyse von Absorbermaterialien mit definierten Strahlquellen. Durch Zwischenschaltung eines Absorbers zwischen Strahlquelle und Detektor wird die Strahlungsintensität am Detektor je nach Absorbermaterial und Strahlungsart durch Absorption, Streuung, Abbremsung, Paarbildung, Photoeffekt, Teilcheneinfang usw. nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten geschwächt. Aus der Schwächung schließt man auf Strahlungsqualität bzw. Absorberzusammensetzung. Bei genaueren Messungen und komplizierten Systemen muß durch Messung an verschiedenen Absorbern oder mit verschiedenen Strahlquellen eine Schwächungsfunktion aufgenommen werden. Die A.

Strahlung	Absorber
Schnelle Neutronen:	Wirkungsquerschnitt prop. zur Ordnungszahl. Er fällt mit $1/v$. Das Bremsvermögen leichter Kerne (H, D, T, He, Li, C) ist sehr groß.
Resonanzneutronen:	Wirkungsquerschnitt variiert sehr stark und unregelmäßig mit Energie und Ordnungszahl. Hohe Absorption: Co, Ir, Rh, In, Cd.
Langsame Neutronen:	Wirkungsquerschnitt prop. $1/v$. Hohe W.Qu.: B, Cd, Gd, Eu, Dy, Sm, Hg, Ir, Au.
Harte Gammastrahlung:	Massenabsorptionskoeffizient nahezu unabhängig von Energie und Absorber.
Weiche Gammastrahlung:	Massenabsorptionskoeffizient ungef. prop. zu $1/E^3$ und zu Z^4/A. Hohe Absorption an den Absorptionskanten der Elemente.
Betastrahlung:	Massenabsorptionskoeffizient nur abhängig von E. Absorption charakterisiert durch Reichweite: harte Betastr. (2 MeV) Reichw. 1000 mg/cm^2 m. harte Str. (1 MeV) Reichw. 450 mg/cm^2 weiche Str. (0,2 MeV) Reichw. 40 mg/cm^2 s. weiche Str. (0,1 MeV) Reichw. 12 mg/cm^2
Alphastrahlung:	sehr roh: Reichweite in mg/cm^2 und Teilchenenergie in MeV sind zahlenmäßig gleich.

kann durch Abfallanalyse und Impulshöhenanalyse ergänzt werden.
Der praktische Wert der A. liegt in der Einfachheit der Messung. Die Tabelle auf S. 37 enthält einige sehr vereinfachte charakteristische Beziehungen zwischen Strahlung und Absorber. [16]
engl.: absorption analysis
franz.: analyse par absorption

Absorptionsfolie, s. Nachtrag.

Absorptionskante. Der Absorptionskoeffizient eines Elementes für Röntgen-Strahlen geht sprunghaft in die Höhe bei Überschreitung der Frequenz, deren $h\nu$-Quant gerade der Ionisierungsenergie eines bestimmten, inneren Elektrons des Atoms entspricht, weil von dieser Frequenz ab der betreffende Ionisierungsvorgang vor sich gehen kann. Nimmt man daher ein kontinuierliches Röntgen-Spektrum auf einer Photoplatte durch eine Schicht eines absorbierenden Elementes hindurch auf, so wird die Schwärzung an dieser Stelle sprunghaft schwächer; es entsteht eine „Kante" (Absorptionsgrenze). Für jede der inneren Schalen des Atoms (s. Atombau) gibt es eine A., also eine K-Kante, eine L-Kante (die streng genommen aus drei eng benachbarten Kanten besteht) usw. Ihrer Bedeutung als der zur Ionisierungsenergie gehörigen Frequenz entsprechend ist die A. jeweils gleichzeitig die Seriengrenze der betreffenden Röntgen-Serie, die K-Kante also die Seriengrenze der K-Serie usw.
Da die wirksame Schicht der Photoplatte Silbersalze enthält, macht sich auch ohne absorbierendes Material auf einer Aufnahme eines kontinuierlichen Röntgen-Spektrums die A. des Silbers bemerkbar, und zwar gerade umgekehrt wie bei einer A., welche durch vorherige Absorption entstanden ist, da verstärkte Absorption im Silber gerade verstärkte Schwärzung der Platte liefert. [1]
engl.: absorption limit
franz.: discontinuité d'absorption
Lit.: Siegbahn, M., Spektroskopie der Röntgenstrahlen, Springer, Berlin, 1931, 2. Aufl.

Absorptionskoeffizient. Bei der Absorption einer Strahlung (s. Strahlungsabsorption) beim Durch-

gang durch Materie ist der A. α durch den reziproken Wert derjenigen Schichtdicke definiert, in der die Intensität I der Strahlung auf den e. Teil abnimmt. Es gilt

$$I = I_0 \, e^{-\alpha \cdot s} \, .$$

Der A. wird meist in cm^{-1} angegeben (linearer A.). In den (häufigen) Fällen, wo neben wahrer Absorption der Strahlung in der Materie auch Streuung auftritt, setzt sich die Abnahme der Strahlungsintensität aus zwei Anteilen zusammen: der Abnahme durch wahre Absorption und der Abnahme durch Streuung. Der A. bezieht sich dann nur auf die Abnahme durch wahre Absorption, während die Abnahme durch Streuung in ganz entsprechender Weise durch einen Streukoeffizienten, die Gesamtabnahme durch einen Schwächungskoeffizienten ausgedrückt wird. Der Schwächungskoeffizient ist die Summe des A. und des Streukoeffizienten. [1]
engl.: absorption coefficient
franz.: coefficient d'absorption

Absorptionskurve, eine Kurve, die die Abhängigkeit der Intensität von der Schichtdicke des durchsetzten Materials angibt, s. a. Absorptionsanalyse. [17]
engl.: absorption curve
franz.: courbe d'absorption

Absorptionsquerschnitt, generell *Wirkungsquerschnitt für die Absorption von Teilchen, speziell Wirkungsquerschnitt für die Absorption von Neutronen durch Atomkerne. Die bei der Anlagerung des Neutrons frei werdende Energie wird von dem entstehenden Verbundkern wieder abgegeben. Das kann durch Ausstrahlung eines γ-Quants ((n, γ)-Reaktion) oder (seltener) eines anderen Kernbausteins (n, d, p, α-Teilchen) oder durch Spaltung des Kerns ((n, f)-Reaktion) geschehen. Der A. bei spaltbaren Kernen setzt sich praktisch aus dem Einfangquerschnitt der (n, γ)-Reaktion (σ_e) und dem Spaltquerschnitt (σ_f) zusammen. Das Verhältnis zwischen beiden wird mit α bezeichnet: $\alpha = \sigma_e/\sigma_f$. Der A. ist energieabhängig. Er befolgt i. a. das $1/v$-*Gesetz. Abweichungen davon werden in der Literatur angegeben.

Der m i k r o s k o p i s c h e A. σ_a [cm²] bezieht sich auf den einzelnen Kern, der m a k r o s k o p i s c h e A. Σ_a [cm⁻¹] auf die Kerne in 1 cm³ (s. Wirkungsquerschnitt, makroskopischer, mikroskopischer). [7]

engl.: absorption cross section

franz.: section efficace d'absorption

Lit.: Hughes und Mitarb., Neutron Cross Section, BNL 325 mit 1 Add. Government Printing Office Washington, D.C., 25 und McGraw Hill, New York, 1956.

Absorptionsweglänge λ_a, die Weglänge, die ein Teilchen (Neutron) im Mittel bis zur Absorption zurücklegt. Analog zur mittleren freien Weglänge λ ist λ_a definiert durch

$$\lambda_a = \frac{1}{N\,\sigma_a} = \frac{1}{\Sigma_a},$$

wobei Σ_a der makroskopische Absorptionsquerschnitt der Substanz ist. λ_a ist i. a. keine geradlinige Strecke, wie es $\lambda = 1/\Sigma$ (Σ totaler Wirkungsquerschnitt) ist. Es können bis zur Absorption durchaus Streuungen (unter Richtungsablenkungen!) stattgefunden haben. [7]

engl.: absorption mean free path

franz.: libre parcours moyen d'absorption

Abstandsgesetz, quadratisches, gibt die Intensität einer Strahlung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Strahlenquelle an. Die Strahlungsintensität an einem Punkt ist dem Quadrat von dessen Abstand zur Strahlenquelle umgekehrt proportional. Dieses Gesetz gilt nur dann, wenn der Abstand groß ist gegenüber der Ausdehnung der Strahlenquelle. [17]

engl.: inverse square law

franz.: loi de l'inverse-carré

Abstellen, s. Abschalten.

Abstreifer, s. Kaskade.

engl.: stripper

franz.: section d'extraction, appauvrissement

Abstreifverhältnis, s. Kaskade.

engl.: stripping ratio

franz.: rapport d'appauvrissement

Abtrennarbeit ist die Energie, die man aufwenden muß, um ein Teilchen aus einem größeren Verband herauszulösen und bis ins Unendliche (praktisch: bis

außerhalb der Reichweite der Bindungskräfte) zu entfernen. Die A. eines Elektrons aus der Elektronenhülle eines Atoms oder Moleküls ist die *Ionisierungsenergie. Im Kern gibt es die A. eines Protons und die A. eines Neutrons, die bei den meisten Kernen beide in der Gegend von 8 MeV liegen. Auch die A. eines α-Teilchens aus dem Kern läßt sich angeben. [1]

engl.: separation energy
franz.: énergie de séparation

Abtriebssäule, unterer Teil der *Rektifiziersäule.

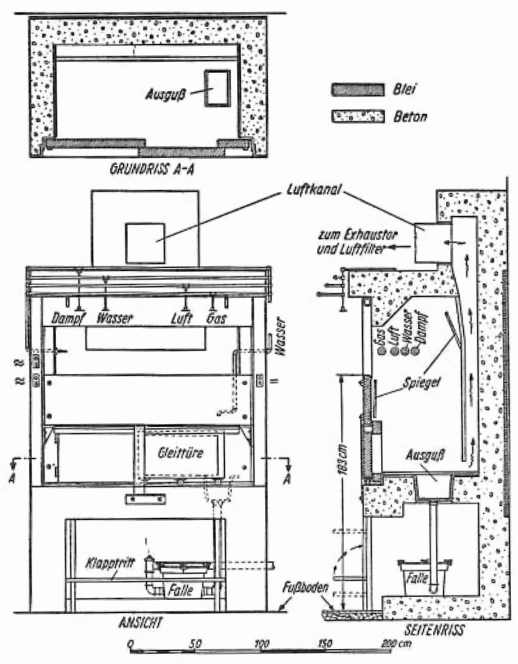
Abziehlack. Filmbildendes Material, das auf Gegenstände, die bezüglich radioaktiver *Verseuchung gefährdet sind, aufgestrichen oder aufgespritzt wird. Die Haftung des Lackfilms auf dem Träger ist so gering, daß er nach eingetretener Verseuchung abgezogen und ausgewechselt werden kann. Die Lackfilme sollen im allgemeinen chemisch beständig und gegen höhere Temperaturen unempfindlich sein sowie hohe mechanische Festigkeit besitzen. [16]

engl.: strippable film paint
franz.: vernis protecteur, v. momentané, v. grattable

Abzug, Arbeitsplatz, meist Laboratoriumsarbeitstisch mit vorzüglich durchsichtiger, zu öffnender Haube, deren Luftinhalt ständig ausgewechselt wird, indem die vorhandene Luft mit einem Exhaustor abgesaugt wird, s. Abb. auf S. 42. Sämtliche Arbeiten mit offenen radioaktiven Präparaten müssen unter einem A. ausgeführt werden. Hierbei ist es ratsam, die angesaugte Luft vor ihrem Ausstoß ins Freie zu filtern und die Luftkanäle nicht mit denen anderer Abzüge, die nicht für radioaktive Arbeiten vorgesehen sind, zu vereinigen. Bedienungsgriffe und Hebel für Wasserleitung, Gas elektrischen Strom usw. sollen ortsfest nicht unter der Abzugshaube, sondern außerhalb angebracht sein. [16]

engl.: fume hood
franz.: chapelle, hotte, sorbonne

Acidität, saure Wirkung eines Stoffes in bezug auf einen Reaktionspartner.
Die saure oder basische Wirkung einer Substanz ist



Radioaktiver Abzug

keine Stoffeigenschaft, sondern eine Funktion des Reaktionspartners. Ein und derselbe Stoff kann sowohl als Säure auftreten, d. h. Protonen abgeben, oder als Base, d. h. Protonen aufnehmen. Die Säuren-Basen-Systeme lassen sich in eine „Spannungsreihe" einordnen, wobei als ordnendes Prinzip in diesem Falle der Säureexponent fungiert. [3]

engl.: acidity

franz.: acidité

Lit.: A. F. Holleman u. E. Wiberg, Anorganische Chemie, De Gruyter, Berlin, 1955.

adjungiert. Es sei M ein bestimmter Differentialoperator, der auf eine Funktion u im Sinne eines Eigenwertproblems wirkt:

$$M u = w u . \tag{1}$$

Dann wird ein „adjungierter" Differentialausdruck $M^\dagger$ und eine „adjungierte" Funktion $u^\dagger$ ($M^\dagger u^\dagger = w^* u^\dagger$, w^* konjugiert komplex zu w) dadurch definiert, daß man fordert

adjungiert

$$u^* \cdot M u - u \cdot M^\dagger u^\dagger = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \,. \qquad (2)$$

X, Y, Z existieren und sind Funktionen von u und $u^\dagger$ und deren Ableitungen. Integriert man die Gl. (1) über den Raum, so ist die linke Seite mit Hilfe des Gaußschen Satzes in ein Oberflächenintegral zu verwandeln. Man bekommt so eine Verallgemeinerung des Greenschen Satzes (in dem $M = M^\dagger =$ dem Laplaceschen Operator Δ ist). Wenn u und $u^\dagger$ physikalische Realitäten darstellen, verschwinden sie auf der sehr fernen Oberfläche. Daher gilt gleichwertig mit (2)

$$\int u^\dagger M u \, \mathrm{d}\tau = \int u M^\dagger u^\dagger \, \mathrm{d}\tau \,. \qquad (3)$$

Wenn $M = M^\dagger$, heißt der Operator selbstadjungiert. In der Eingruppenbehandlung des nackten Reaktors entspricht der Gl. (1) die Diffusionsgleichung für die thermischen Neutronen

$$v \cdot \mathrm{div}(D \,\mathrm{grd}\, \Phi) + \alpha \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial t} = w \Phi \,, \qquad (4)$$

wenn $\Phi \sim e^{wt}$ (w reell) und $\alpha = (k-1) \cdot \Sigma_a \cdot v$. Es ist also

$$M = v \,\mathrm{div}\, D \,\mathrm{grd} + \alpha; \quad u = \Phi \,. \qquad (5)$$

M ist selbstadjungiert. Die adjungierte Gleichung heißt daher

$$M \cdot \Phi^\dagger = w' \Phi^\dagger \,. \qquad (6)$$

Multipliziert man (4) mit $\Phi^\dagger$, (6) mit Φ von links, integriert und subtrahiert, so entsteht

$$\int \Phi^\dagger M \Phi \, \mathrm{d}\tau - \int \Phi M^\dagger \Phi^\dagger \, \mathrm{d}\tau = (w - w') \int \Phi \Phi^\dagger \, \mathrm{d}\tau \,. \qquad (7)$$

Ist $w \neq w'$, so muß wegen (3) $\int \Phi \Phi^\dagger \, \mathrm{d}\tau = 0$ sein,

d. h. die adjungierte Funktion ist orthogonal zur Ausgangsfunktion.

In der Mehrgruppentheorie ist M eine quadratische Matrix (s. Matrixdarstellung der Reaktorgleichung), Φ ist eine Spaltenmatrix. $M^\dagger$ erhält man dann, indem man jedes M_{kl} durch die komplex-konjugierte Zahl ersetzt und dann Zeilen und Spalten vertauscht, also

$$M_{kl}^\dagger = M_{lk}^* . \tag{8}$$

In der Reaktorgleichung sind alle Elemente reell. – Die Orthogonalität der adjungierten Funktionen ist wie oben zu zeigen.
Bei Integral- bzw. Integrodifferentialoperatoren O drückt sich die Adjungiertheit in der Vertauschung der Variablen des Kerns $K(x, x_0)$ aus. Ist

$$O \cdot u = \int_a^b K(x, x_0)\, u(x_0)\, \mathrm{d}x_0 ,$$

so gilt für den adjungierten Operator

$$O^\dagger u^\dagger = \int_a^b K(x_0, x)\, u^\dagger(x_0)\, \mathrm{d}x_0 .$$

[7]

engl.: adjoint

franz.: adjoint

Lit.: A. Sommerfeld, Einf. in die theor. Physik VI, Akad. Verlagsges., Leipzig. – Morse and Feshbach, Methods of Theoretical Physics I, S. 877, McGraw Hill, New York, 1953.

Adsorption ist ein typischer Grenzflächenprozeß zwischen zwei Phasen verschiedenen thermodynami-

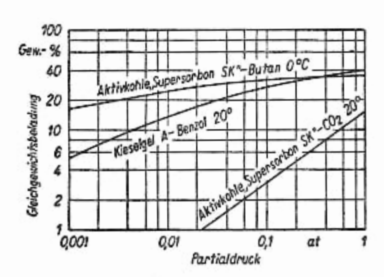


Abb. 1

schen Potentials, bei dem sich energetische Umsätze vorzugsweise ohne Stoffumwandlung abspielen: Das S o r p t i v (der aufzunehmende Stoff, auch S o r b -

end genannt), ein Gas oder eine Flüssigkeit, wird von dem Sorbens, dem Stoff höheren thermodynamischen Ordnungsgrades, also einer Flüssigkeit bzw. einem festen Körper an seiner Oberfläche angereichert. Die Oberfläche des Sorbens in diesem Sinne braucht nicht mit seiner geometrischen Oberfläche (s. Körnung) übereinzustimmen (z. B. hat 1 g Aktivkohle bis zu 700 m² „physikalische" Oberfläche, während die geometrische Oberfläche bei einer Korngröße von 10 μ nur etwa 0,5 m² beträgt). Die Beziehung zwischen der Konzentration c des Sorptivs in seiner Mischung

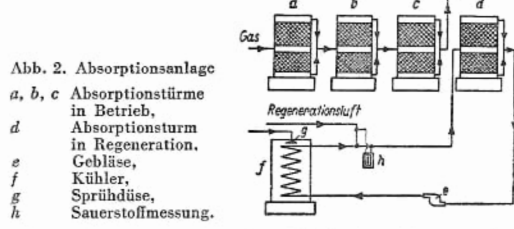


Abb. 2. Absorptionsanlage
a, b, c Absorptionstürme in Betrieb,
d Absorptionsturm in Regeneration,
e Gebläse,
f Kühler,
g Sprühdüse,
h Sauerstoffmessung.

oder Lösung (oder dem Partialdruck p des zu adsorbierenden Gases in seiner Mischung mit anderen Gasen) und der Konzentration c an der adsorbierenden Oberfläche bei konstanter Temperatur, die Oberflächenkonzentration $c = f(c)_T$ bzw. $c = f(p)_T$ (mol/cm²) wird aus Zweckmäßigkeitsgründen in der Verfahrenstechnik meist nicht angewendet. An ihre Stelle tritt die Beladung x in Gewichtsprozent, die in der Form der sog. Adsorptionsisothermen (Abb. 1)

$$x = a \cdot c^n \quad \text{bzw.} \quad x = a \cdot p^n ,$$

einer empirisch gefundenen Formel (Boedecker-Freundlich), mit der Oberflächenkonzentration zusammenhängt. Die „Konstanten" a und n richten sich nach dem betrachteten Stoffpaar, sind aber auch hier nicht immer konstant, weil sie den Einfluß der Annäherung an die Sättigungsbeladung (bei hohen Konzentrationen) nicht berücksichtigt. Daher sind die Isothermen oft gekrümmt, was sie nach der obigen Formel nicht sein dürften (s. Abb. 1). Die A. zeigt eine

Wärmetönung. Sie beträgt rd. das 1,5fache der Kondensationswärme des betreffenden Sorptivs. Zur genauen Bestimmung sind kalorimetrische Messungen erfor-

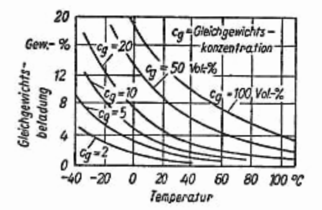


Abb. 3

derlich, die die integrale Adsorptionswärme, also den Durchschnittswert für die gesamte aufgenommene Menge, liefern (im Gegensatz zur differentialen Adsorptionswärme, die mit zunehmender Beladung abnimmt). Technisch interessiert vor allem aber die Beladung bei konstantem Partialdruck als Funktion der Temperatur. Sie wird durch die Adsorptionsisobare dargestellt, die die Gleichgewichtsbeladung über der Temperatur mit der Gleichgewichtskonzentration als Parameter zeigt (Abb. 3). Die wichtigsten Sorbentien sind Aktivkohle, Tonerdegel, Kieselgel (Silicagel) und Silicarbon. Sie werden in Korngrößen von 3 bis 8 mm verwendet. Das älteste Verfahren besteht darin, daß nach beendigter A. – also absatzweise – das Sorbens durch Erhitzung im Gasstrom (z. B. Luft) wieder aktiviert wird: Das Sorptiv wird dabei ausgetrieben und in zweckentsprechender Weise gewonnen oder beseitigt. Die Wiederbelebungstemperaturen liegen bei 150 bis 250 °C. Neuerdings sind Anlagen entwickelt worden, die auch eine stetige A., also mit Anwendung einer stetigen *Desorption, erlauben (USA: Hypersorptionsverfahren).

A. zur Trennung von Isotopen. Die A. bzw. Desorption hat bisher nur bei Wasserstoff-Deuterium-Mischungen zu einer Anreicherung von Isotopen geführt. Die erreichten Trenngrade sind in diesem Fall so hoch, daß sie nicht durch Gleichgewichtseffekte erklärt werden können, sondern kinetische Effekte (u. U. quantenmechanische Tunneleffekte) eine Rolle spielen.

Am besten eignet sich Silicagel als Adsorbens; für die Belegungsdichte und die Adsorptionstemperatur bestehen enge Grenzen. [2, 14]
engl.: adsorption
franz.: adsorption

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. – K. Bratzler, Adsorption von Gasen und Dämpfen in Laboratorium und Technik, Leipzig, 1944.

A.D.U., amerikanische Abk. für Aluminiumdiuranat.

AEA. Abk. für die britische Atomenergiebehörde (Atomic Energy Authority), auch U.K.A.E.A. (United Kingdom A.E.A.). [24]

AEC. Abk. für die amerikanische Atomenergiekommission (Atomic Energy Commission). [24]

AERE. Abk. für das englische Atomforschungszentrum in Harwell (Atomic Energy Research Establishment). [24]

Aërion, Warenzeichen der PTW (Physikal. Techn. Werkstätten) Freiburg i. Br., svw. Luftwandmaterial. Es ist ein auf Kunstharzbasis aufgebautes Material, das zur Erzielung derselben effektiven Ordnungszahl, wie sie der Luft zuzuordnen ist, Magnesium- und Alkaliverbindungen sowie Graphit in geeigneten Verhältnissen enthält. A.-Wände von Ionisationskammern sind somit für Röntgen- und γ-Strahlen luftäquivalent. S. Luftwändekammer. [28]

Aerosolfilter, s. Filter, absolute.

AfK, Arbeitsgemeinschaft für Kerntechnik der technisch-wissenschaftlichen Vereine in der Bundesrepublik, stellt einen losen Zusammenschluß der Vereine dar, die sich auf dem Gebiet der Kerntechnik und -wissenschaft für friedliche Zwecke betätigen. Sie arbeitet vor allem an Fragen, die von übergeordneter Natur sind. [7]

AG-Beschleuniger, s. Fokussierung, starke.
engl.: A-G-accelerator, strong focussing accelerator
franz.: accélerateur à gradient alterné

AGC, Abk. für automatic gain control, automatische Verstärkungsregelung. [6]

Aggregatrückstoß, s. Nachtrag.

Agranulozytose. Bei der A. handelt es sich um ein schweres, meist hochfieberhaftes Krankheitsbild mit Schwund der neutrophilen (mit neutralen Farbstoffen

anfärbbaren) weißen Blutkörperchen bei häufig normaler Zahl an roten Blutkörperchen im Blut, das u. a. nach Einwirkung größerer Strahlendosen beobachtet wird. Nach einer Bestrahlung mit Dosen von 200 bis 400 r sterben 50 % der davon Betroffenen in der akuten Krankheitsphase unter dem Bild einer A. [28]
engl.: agranulocytosis *franz.: agranulocytose*

Ähnlichkeitsgesetze der Wärmeübertragung. Mit den Ä.n ist es möglich, die an einem Modell gewonnenen Versuchsergebnisse zu verallgemeinern. Beim Aufsuchen der Gesetze hat man zunächst dimensionslose Kennzahlen festzulegen, die bei dem Modell und der Originalausführung denselben Zahlenwert haben müssen (physikalische Ähnlichkeit). Das Experiment

Bezeichnung	Abk.	Definition
Fourier-Zahl	Fo	$a\,t/l^2$
Froude-Zahl	Fr	$w^2/l\,g$
Grashof-Zahl	Gr	$g\,\beta\,\vartheta\,l^3/\nu^2$
Graetz-Zahl	Gz	$\frac{\pi}{4}\,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\,\frac{d}{l}$
von Kármán-Zahl	Ka	$\frac{1}{2}\,\mathrm{Re}^2\,\lambda_f$
Lewis-Zahl	Le	$\frac{a}{k} = \frac{\mathrm{Sc}}{\mathrm{Pr}}$
Mach-Zahl	Ma	w/w_s
Nußelt-Zahl	Nu	$\alpha\,l/\lambda$
Péclet-Zahl	Pe	$\frac{w\,l}{a} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}$
Prandtl-Zahl	Pr	$\frac{\nu}{a} = \frac{\eta\,c_p}{\lambda} = \frac{\mathrm{Pe}}{\mathrm{Re}} = \frac{\mathrm{Sc}}{\mathrm{Le}}$
Reynolds-Zahl	Re	$l\,w/\nu$
Schmidt-Zahl	Sc	$\frac{\nu}{k} = \mathrm{Le}\,\mathrm{Pr}$
Stanton-Zahl	St	$\frac{\alpha}{w\,\varrho\,c_p} = \frac{\mathrm{Nu}}{\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}}$

liefert dann den funktionalen Zusammenhang der Kennzahlen. Die im Bereich der Wärmeübertragung gebräuchlichen Kennzahlen sind in der nebenstehenden Tabelle zusammengestellt:
Dabei ist a die Temperaturleitzahl, c_p die spezifische Wärme, d der Durchmesser, g die Erdbeschleunigung, k die Wärmedurchgangszahl, l eine kennzeichnende Länge, t die Zeit, w die Geschwindigkeit, w_s die Schallgeschwindigkeit, α die Wärmeübergangszahl, β die thermische Ausdehnungszahl, η die dynamische Zähigkeit, ϑ die Temperatur, λ die Wärmeleitzahl, λ_f die Widerstandsziffer, ν die kinematische Zähigkeit und ϱ die Dichte. (In der französischen Literatur sind für die Kennzahlen Bezeichnungen üblich, die von den oben genannten abweichen.) Von den zahlreichen, auf Grund der Ähnlichkeitstheorie entwickelten Gebrauchsformeln sind in der Reaktortechnik diejenigen besonders wichtig, die zur Berechnung der Wärmeübergangszahl α bei erzwungener und freier *Konvektion benutzt werden können. Diese haben die allgemeine Form

$$\mathrm{Nu} = F(\mathrm{Re}, \mathrm{Gr}, \mathrm{Pr})$$

oder

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} F(\mathrm{Re}, \mathrm{Gr}, \mathrm{Pr}) \, .$$

[5]
engl.: dimensional analysis
franz.: règles d'analogie de la transmission de la chaleur

Lit.: Gröber, Erk, Grigull, Wärmeübertragung, 3. Aufl., Springer, Berlin, 1955.

AIEE, American Institute of Electrical Engineers. [6]

AIF. Abk. für Atomic Industrial Forum, eine amerikanische Studiengesellschaft für Anwendung und Entwicklung der Atomenergie, deren internationale Mitgliedschaft sich vor allem aus Industriekreisen zusammensetzt. [24]

Aktiniden. Der Name ist vorgeschlagen für die chemischen Elemente mit den Ordnungszahlen 90 bis 102 in Analogie zu den „Lanthaniden". Wahrscheinlich gehört das noch nicht isolierte Element 103 auch hierzu. Die Bezeichnung gründet sich auf die fortschreitende Auffüllung der 5 f-Schale, die insbesondere für die

Elemente 92 bis 96 nachgewiesen werden konnte und das Aktinium-ähnliche Verhalten von Curium. Man hat für Teilreihen auch Thoride und Uranide vorgeschlagen. [7]

engl.: actinides *franz.: actinides*

Aktinium, radioaktives Element der Ordnungszahl 89. Chemisches Symbol Ac. Sein wichtigstes Isotop hat die Massenzahl 227 und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 22 Jahren unter β-Emission (daneben in geringem Maße auch α-Zerfall). Dieses Isotop ist der Namens-Vertreter der Uran-Aktinium-Zerfallsreihe (s. Zerfallsreihen, radioaktive). Es entsteht aus Aktinouran (Ordnungszahl 92; Massenzahl 235) und endigt nach fünf α-Emissionen beim stabilen Bleiisotop 207. Ein anderes Isotop des Ac kommt als Mesothorium 2 (Massenzahl 228) in der Thoriumreihe vor. Endlich kennt man seit kurzem noch fünf weitere Isotope, vor allem eines der Massenzahl 225, das als α-Strahler in der Neptuniumreihe auftritt. Das A. ist das Anfangselement der Reihe der „Aktiniden", der Elemente mit den Ordnungszahlen 89 bis 102. [1]

engl.: actinium *franz.: actinium*

Lit.: Meyer-Schweidler, Radioaktivität, Teubner, Leipzig, 1927, 2. Aufl. – Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen, I. Bd., 5. Teil, Springer, Berlin, 1952, 6. Aufl.

Aktiniumreihe, die Reihe der Kerne, die durch den α-Zerfall des $^{235}_{92}U$ entstehen. Die Massenzahl aller Kerne ist $4\,n + 3$, wobei n eine ganze Zahl bedeutet. Lebensdauer und Zerfallsart der Kerne dieser Reihe sind auf S. 51 aufgeführt. S. a. Zerfallsreihen, radioaktive. [18]

engl.: actinium series *franz.: série de l'actiniun*

Aktinometrie, Strahlungsmeßmethode. Durch Veränderung definierter chemischer Systeme kann die Energie der Strahlung bestimmt werden. [18]

engl.: actinometry *franz.: actinométrie*

Aktinon, s. Emanation.

Aktinouran, Uranisotop in der Aktiniumreihe, $^{235}_{92}U$. [7]

Aktivierung bedeutet Erzeugung radioaktiver Atomkerne durch Neutronenbeschuß, im erweiterten Sinne auch durch Bestrahlung mit irgendwelchen anderen Teilchen wie Protonen, Deuteronen oder γ-Strahlen.

Actiniumreihe

$^{235}_{92}U$

α ↓ $8{,}8 \cdot 10^8$ a

$^{231}_{90}Th$ (U Y)

β^- ↓ 25,65 h

$^{231}_{92}Pa$

α ↓ $3{,}43 \cdot 10^4$ a

$^{227}_{89}Ac$

21,7 a

α (1,2 %) → $^{223}_{87}Fr$ (Ac K)

β^- (98,8 %) → (Rd Ac) $^{227}_{90}Th$

$^{223}_{87}Fr$: β^- (21′) → $^{223}_{88}Ra$

$^{227}_{90}Th$: α (18,6 a) → $^{223}_{88}Ra$

$^{223}_{88}Ra$ (Ac X)

α ↓ 11,2 d

$^{219}_{86}En$ (An)

α ↓ 3,92 s

$^{215}_{84}Po$ (Ac A)

($1{,}83 \cdot 10^{-3}$ s)

α (~ 100 %) → $^{211}_{82}Pb$ (Ac B)

β^- ($5 \cdot 10^{-4}$ %) → $^{215}_{85}At$

$^{211}_{82}Pb$: β^- 36,1 m → $^{211}_{83}Bi$

$^{215}_{85}At$: α ~ 10^{-4} s → $^{211}_{83}Bi$

$^{211}_{83}Bi$ (Ac C)

(2,16m)

α (99,68 %) → $^{207}_{81}Tl$ (Ac C″)

β^- (0,32 %) → (Ac C′) $^{211}_{84}Po$

$^{207}_{81}Tl$: β_- 4,76 m → $^{207}_{82}Pb$

$^{211}_{84}Po$: $5 \cdot 10^{-3}$ s → $^{207}_{82}Pb$

$^{207}_{82}Pb$ (Ac D) (Stabil)

Der A. entspricht bei der Atomhülle die Anregung.

A. der Kühlmittel. Das Kühlmittel eines Reaktors kann auf verschiedene Arten aktiviert werden.

1. Direkte Aktivierung des Kühlmittels und seiner Verunreinigungen durch Neutronen.

2. Lösung und Erosion von aktivierten Substanzen von den Wänden der Kühlschlange.

3. Ablösung von Spaltprodukten von der Oberfläche von Brennstoffelementen, die mit Uran kontaminiert sind.

Die gebräuchlichsten Kühlmittel sind folgende:

1. H_2O. Hierin wird der Sauerstoff aktiviert.

2. Luft und CO_2. Hierbei ist außer mit der Aktivierung des Sauerstoffes mit der Bildung A^{41} zu rechnen.

3. Natrium. Hierbei wird ^{23}Na mit einem Wirkungsquerschnitt von 0,56 barn aktiviert.

A. von Verunreinigungen. Ein Teil der Materialien, die beim Bau eines Reaktors verwendet werden, enthält Verunreinigungen, die bei Bestrahlung mit Neutronen aktiviert werden können. Zum Beispiel ist bei manganhaltigem Eisen die Aktivität des aktivierten Mangans höher als die des aktivierten Eisens. Ebenso ergibt eine Beimengung von 0,026 % Kobalt zum Stahl eine höhere Aktivität als die der ganzen Eisenmenge. Auch bei Kühlwasser wird ein großer Teil der Aktivität durch Aktivierung von Verunreinigungen gegeben. Daher wird vielfach *Nuklearreinheit der beim Reaktorbau verwendeten Materialien gefordert. [7, 17]

engl.: activation *franz.: activation*

Aktivierungsanalyse. Methode zur quantitativen Bestimmung kleiner Konzentrationen eines Elementes neben einem großen Überschuß anderer Elemente durch Messung der bei der Bestrahlung des Materials mit Neutronen oder anderen energiereichen Teilchen erzeugten *Aktivität.

Der Bestrahlung muß eine chemische Isolierung der gesuchten radioaktiven Substanz folgen, die in üblicher Weise mit *Träger durchgeführt wird. Gleichzeitige Bestrahlung einer bekannten Menge des Elements und Berücksichtigung der Neutronenabsorption anderer Bestandteile lassen von der gefundenen auf die wirk-

liche Substanzmenge schließen. Natürliche radioaktive Stoffe können ebenfalls durch Messung ihrer Aktivität bestimmt werden. [3]
engl.: activation analysis
franz.: analyse par activation

Aktivierungsquerschnitt ist der *Wirkungsquerschnitt, unter dem die Aktivierung eines (stabilen) Atomkerns unter dem Einfluß eines Bombardements mit irgendwelchen Teilchen erfolgt. Der Ausdruck wird meist für Neutronenbeschuß gebraucht. Einheit barn $= 10^{-24}\,\mathrm{cm}^2$. Unter Umständen können bei der Bestrahlung verschiedene Arten aktiver Kerne erzeugt werden. In diesem Fall ist das Endprodukt anzugeben. [7]
engl.: activation cross section
franz.: section efficace d'activation

Aktivität, 1. mitunter als Abk. für *Radioaktivität gebraucht, insbes. α-A., β-A., γ-A.; bei relativen Messungen benutzt zur Kennzeichnung einer Zählrate.
2. Eine Größe, die der Zahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne proportional ist. Die A. wird in Curie (Abk. c) gemessen. 1 c entspricht einer A., bei der je Sekunde $3{,}700 \cdot 10^{10}$ Kerne zerfallen. [1, 7]
engl.: radioactive activity
franz.: activité radioactive

Aktivität, spezifische, heißt die Aktivität von 1 g eines radioaktiven Stoffes. Die sp. A. von Radium ist z. B. $1\,\mathrm{c\,g^{-1}}$, die von Uran 238 ist $3{,}3 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{c\,g^{-1}}$, die von Kobalt 60 ist $1100\,\mathrm{c\,g^{-1}}$ (Sättigungsaktivität bei Aktivierung mit 10^{14} Neutronen $\mathrm{cm^{-2}\,s^{-1}}$). Man erhält die sp. A. aus der Halbwertszeit H (in s) und der Massenzahl A des betreffenden Stoffes als

$$\sigma = \frac{1{,}13 \cdot 10^{13}}{A \cdot H}\,\mathrm{c\,g^{-1}}\,. \qquad [1]$$

engl.: specific activity *franz.: activité spécifique*

Aktivitätskurve, graphische Darstellung des zeitlichen Aktivitätsverlaufes. Trägt man den Logarithmus der Aktivität gegen die Zeit auf, so erhält man eine Gerade. [3]
engl.: activity curve *franz.: courbe d'activité*

Aktivkohle-Filter (Tierkohle) eignen sich neben

Kieselgurfiltern zur Entfernung von Kolloiden aus radioaktiven Prozeßlösungen, vor allen Dingen zur Filtration von kolloidalem Rutheniumsulfid. Tiefgekühlte A.-F. (−80 °C) werden zur Entfernung von radioaktivem Xenon aus Abgasen benützt. Auch Jod wird von Aktivkohle zurückgehalten. [22]

engl.: charcoal filter
franz.: filtre au charbon (activé)

Alarm, a l l g e m e i n : Warnung der Öffentlichkeit bei ernsthaften Unfällen; s p e z i e l l , bei normaler Reaktorbedienung, optische oder akustische Anzeige bedenklicher, aber noch nicht eigentlich gefährlicher Störungen des normalen Betriebszustandes der Reaktoranlage. Die speziellen A. zeigen Störungen an, die, ohne momentan gefährlich zu sein, baldige Gegenmaßnahmen erfordern, wenn ein weiteres gefährliches Ansteigen der Störung oder eine gefährliche Dauerwirkung verhindert werden soll. Die Ausführung geeigneter Gegenmaßnahmen wird dabei dem Bedienungspersonal überlassen. Häufig besteht jedoch zum *Sicherheitssystem eine enge Verbindung insofern, als dieselben Signalgrößen bei größeren Werten oder nach bestimmten Wartezeiten auch direkt *Sicherheitsoperationen auslösen können.
Wegen der Vielzahl der möglichen Alarmfälle werden zumeist Kombinationen eines allgemein informierenden akustischen A. mit individuell anzeigenden optischen A. angewandt. Dabei ist es günstig, wenn letzterer so ausgelegt wird, daß sofort zu erkennen ist, ob bereits ein A. vorliegt und ob das Störsignal noch wirksam ist, ferner ob der A. bereits bemerkt und die Kenntnis davon durch das Betätigen einer besonderen Quittieranlage anerkannt wurde. Die optischen Alarmtafeln müssen in der *Schaltwarte so angeordnet werden, daß sie ständig vom *Bedienungspult aus beobachtet werden können. [9]

engl.: alarm *franz.: alarme*

Albedo. Das Intensitätsverhältnis der diffus von einer Fläche reflektierten Strahlung zu der auffallenden Strahlung wird in der Optik als A. bezeichnet. Der Begriff ist auf diffundierende Neutronen zu übertragen.

Als reflektierende Fläche gilt hier die Grenzfläche zwischen zwei Medien, z. B. beim Reaktor die zwischen Moderator und Reflektor. Auf der Basis der Diffusionstheorie definiert man einen Reflektionskoeffizienten, die A., durch die Zahl der Neutronen, die durch die Grenzschicht aus dem Reflektor in den inneren Teil des Reaktors gelangen, relativ zu denen, die in umgekehrter Richtung wandern. Bezeichnet man den Neutronenfluß mit Φ, so gilt demnach

$$\beta = \left. \frac{\Phi/4 + D/2 \cdot d\Phi/dx}{\Phi/4 - D/2 \cdot d\Phi/dx} \right| \text{Grenze}$$

(D Diffusionskonstante $= 1/3 \cdot$ Transportweglänge). Da Φ von der Geometrie abhängt, ist auch β geometrieabhängig. β ist also verschieden z. B. für ebene Grenzflächen und Kugeloberflächen. Außerdem hängt der Fluß von der Dicke des Reflektors ab. Für sehr dicke, unendlich ausgedehnte, ebene Reflektoren gilt

$$\beta = \frac{1 - 2\,D/L}{1 + 2\,D/L} \approx 1 - 4\,\frac{D}{L},$$

weil in der Praxis meist $D/L \ll 1$ (L bedeutet die Diffusionslänge, D die Diffusionskonstante für das Reflektormaterial). [7]

engl.: albedo *franz.: albédo*

Alfvén-Wellen, s. Wellen, magnetohydrodynamische.

engl.: Alfvén waves *franz.: ondes d'Alfvén*

Alkyl-Pyrophosphate sind Ester; sie entstehen durch Einwirkung von Phosphorpentoxyd auf Alkohole. Sie werden bei der Brennstoffaufbereitung in Konzentrationen von 2 %, gelöst in Kerosin, zur Flüssig-Extraktion von Uranylnitrat aus sauren, wäßrigen Lösungen benutzt. Das Uranylnitrat wird aus ihnen mit 48 % HF-Säure ausgewaschen. [22]

engl.: alkyl pyrophosphate

franz.: pyrophosphate d'alkyle

Allobar. Ein A. ist ein Element, das eine andere als die natürlich vorkommende Isotopenzusammensetzung aufweist. Zum Beispiel ist angereichertes Uran ein A. zum natürlichen Uran. [7]

engl.: allobar *franz.: allobare*

α (Alpha). Der durch Neutronenbeschuß entstandene Verbundkern einer spaltbaren Substanz (Uran 233 und 235, Plutonium 239) kann die zugeführte Energie durch Emission eines γ-Quants oder durch Spaltung abgeben. Das Verhältnis des Wirkungsquerschnitts für Strahlungseinfang σ_e zu dem für Spaltung σ_f wird mit α bezeichnet, also $\alpha = \sigma_e/\sigma_f$. [7]

Alpha-Eisen (Ferrit). Die kubisch raumzentrierte Modifikation des *Eisens, welche unterhalb 906° stabil ist. Reines Alpha-Eisen ohne Kohlenstoff ist weich und ferromagnetisch, besitzt jedoch keine magnetische Remanenz. [4]
engl.: ferrite
franz.: ferrite

Alpha-Spektrum. Viele radioaktive Atomkerne senden α-Strahlen nicht nur einer bestimmten Energie aus, sondern mehrere Gruppen jeweils scharf definierter Energien, Thorium C z. B. fünf solcher Gruppen mit Energien zwischen 5,6 und 6,1 MeV. Die Zusammenfassung der Energielagen aller α-Strahlen eines bestimmten Kernes nennt man sein A. Die Bezeichnung „Spektrum" ist hier also nicht im Sinne von Frequenzspektrum wie in der Optik, sondern im Sinne von Energiespektrum gemeint; man spricht jedoch genau so von α-Linien bei bestimmten Energien, wie von optischen (oder Röntgen-)Spektrallinien bei bestimmten Frequenzen.
Das A. kommt dadurch zustande, daß der radioaktive Ausgangskern in einen Endkern übergeht, welcher verschiedener Energieniveaus fähig ist. Beim Übergang in den Grundzustand des Endkerns geht am meisten Energie auf das ausgeschleuderte α-Teilchen über, beim Übergang auf einen energiereicheren angeregten Zustand entsprechend weniger. [1]
engl.: alpha spectrum
franz.: spectre de rayons alpha

Alpha-Strahlen sind derjenige Teil der radioaktiven Strahlungen (s. Radioaktivität), der aus mit großer Energie ausgeschleuderten α-Teilchen, d. s. Heliumkerne, besteht.
Die A.-S. jedes radioaktiven Kerns haben je Teilchen

eine für ihn charakteristische, ganz bestimmte Energie, oder einige wenige solcher Energien (s. Alpha-Spektrum), welche meist in der Größenordnung einiger Millionen eV (MeV) liegen. Die höchste Energie haben die A.-S. des Th C′ mit 8,8 und die des Ra C′ mit 10,5 MeV; die A.-S. des Radiums haben nur eine Energie von 4,9 MeV. Mit Hilfe des Zyklotrons gelingt es heute, „künstliche A.-S." mit Energien bis zu 680 MeV herzustellen. In Geräten wie dem Bevatron, das aber vorläufig nur für Protonen angewandt wird, können noch sehr viel höhere Energien erreicht werden.
Die Anzahl der von einem radioaktiven Präparat ausgesandten α-Teilchen richtet sich nach der Menge und nach der Halbwertszeit des in ihm enthaltenen radioaktiven Elements. 1 g reines Radium sendet je Sekunde $3{,}7 \cdot 10^{10}$ α-Teilchen aus; zusammen mit seinen Folgeprodukten die fünffache Anzahl. Das sehr viel langlebigere Uran (U I + U II, wie es im natürlichen Uran gemischt ist) ergibt nur ca. 25 000 α-Teilchen je Gramm und Sekunde.
Die Geschwindigkeit der A.-S. ist durch ihre Energie eindeutig bestimmt. Ein α-Teilchen von 4,9 MeV (Radium) besitzt eine Geschwindigkeit von ca. 15 000 km s^{-1}, ein künstliches Teilchen von 400 MeV Energie eine solche von 130 000 km s^{-1}, also schon fast die halbe Lichtgeschwindigkeit.
Beim Durchgang durch Materie erleiden die A. nur eine geringfügige Streuung (s. Streuung der α-Teilchen), verlieren aber durch *Ionisation der durchquerten Atome allmählich ihre hohe Energie, so daß sie nach Durchlaufen einer gewissen, ziemlich genau definierten Strecke, ihrer Reichweite, stecken bleiben. Die Reichweite hängt von der Energie der A.-S. (s. Energie-Reichweite-Beziehung) und von dem durchsetzten Stoff ab. In Luft von Normaldruck ist sie für A.-S. von 8,6 MeV Energie (Thorium C′) ca. 9 cm, in Metallen rechnet sie bei derselben Energie nur noch nach hundertstel Millimetern. Die A.-S. sind also von den drei radioaktiven Strahlungen die am wenigsten durchdringenden. Dies hängt mit der starken, durch sie bewirkten Ionisation zusammen.
Beim Aufprall auf einen Atomkern vermögen energie-

reiche α-Teilchen diesen unter Umständen umzuwandeln (s. Kernumwandlungen); sie sind als Geschosse für diesen Zweck, verglichen mit Protonen, Deuteronen und insbesondere Neutronen verhältnismäßig wenig wirksam. Die erste, von Rutherford 1919 entdeckte künstliche Kernumwandlung wurde jedoch durch A.-S. bewirkt.

Zum Nachweis und zur Messung der A.-S. dient vor allem die Ionisationskammer, der Spitzenzähler, evtl. auch das Zählrohr, und die Nebelkammer, welche die ganze Flugbahn der einzelnen α-Teilchen sichtbar macht. Mittels der ersteren Apparate lassen sich die α-Teilchen ihrer starken Ionisation wegen am leichtesten von allen Partikelchen einzeln registrieren, also auch zählen. Ein α-Teilchen erzeugt in Luft von Normaldruck je cm seiner Bahn etwa 30 000 Ionenpaare. [1]

engl.: alpha rays

franz.: rayons alpha

Lit.: St. Meyer u. E. Schweidler, Radioaktivität, 2. Aufl., Teubner, Leipzig, 1927. – W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Alpha-Strahlen-Spektrometer ist ein *Spektrometer zur Feststellung des α-Strahlen-Spektrums, wobei ein ausgeblendeter α-Strahl ein senkrecht zu seiner Bahn wirkendes homogenes, konstantes Magnetfeld durchdringt. Das α-Teilchen beschreibt eine Kreisbahn, dessen Radius proportional zu seinem Impuls (und umgekehrt proportional der Ladung des Teilchens) ist. Wenn die Teilchen einen Winkel von 180° beschrieben haben (Halbkreis), treffen sie auf einen Film auf, auf dem sie eine Schwärzung hinterlassen. Hierdurch kann über den Radius des Kreises auf die Energie des Teilchens geschlossen werden. [28]

engl.: α-ray spectrometer

franz.: spectromètre à rayons α

Alpha-Strahler, ein radioaktiver Stoff, der α-Strahlen aussendet. Beispiele von A.n sind Uran, Thorium, Radium, Polonium in ihren Hauptisotopen, Emanation in allen drei Isotopen, Samarium 147 (einziger A.-S. mit Massenzahl unterhalb 198!) und zahlreiche Isotope der Transurane. [1]

engl.: α-emitter *franz.: émetteur α*

Alpha-Teilchen, die Partikelchen, die α-Strahlen bilden, sind die Kerne des „normalen Heliums ^4_2He". Ihre Ruhmasse beträgt 4,00278 Kernmasseneinheiten oder $6{,}644 \cdot 10^{-24}$ g. Sie sind mit zwei Elementarladungen positiv geladen. Ihr Spin und ihr magnetisches Moment sind Null. Jedes A.-T. ist in einer offenbar sehr symmetrischen Weise aufgebaut aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Da diese zusammen die höhere Masse 4,03315 ergeben, ist der Massendefekt der A.-T. 30,37 TME, was einer Bindungsenergie von rund 28 MeV entspricht. Infolge dieser hohen Bindungsenergie (das Deuteron z. B. hat nur 2,2 MeV) ist das A.-T. ein besonders stabiles Gebilde. [1]
engl.: alpha-particle
franz.: particule alpha

Alphatron, Ionisationsmanometer, das den Gasdruck in einer Vakuumanlage mißt. Ein radioaktives Präparat ionisiert Gasatome in einer Entladungsstrecke durch Alphateilchen. Die Stromstärke ist der Gasdichte proportional. Brauchbar besonders oberhalb 10^{-3} Torr. [6]
engl.: alphatron
franz.: alphatron

Alpha-Uran, s. Uran.
engl.: α-uranium
franz.: uranium alpha

Alpha-Zerfall, radioaktiver Zerfall unter Aussendung von α-Strahlen, kommt nur bei den schwersten Kernen von der Ordnungszahl 83 an aufwärts vor, mit der Ausnahme des Samariums (Ordnungszahl 62) und einiger weniger anderer leichterer Kerne. [1]
engl.: alpha decay
franz.: désintégration alpha

Alphazählrohr, s. Zählrohr.

Alphina-Teilchen nennt man in Analogie zum α-Teilchen häufig den Kern des leichten Heliumisotops ^3_2He. Seine Ruhmasse beträgt 3,01592 Masseneinheiten. Sein Spin ist $^1/_2$, sein magnetisches Moment 2,13 Kernmagnetonen. Es ist zusammengesetzt aus zwei Protonen und einem Neutron. Seine Bindungsenergie ist 9 MeV (gegenüber 28 MeV beim α-Teilchen). [1]
engl.: alphina particle *franz.: particule alphina*

Alter, s. Alterstheorie und Fermi-Alter.

Altersgleichung, Fermische, s. Alterstheorie.
engl.: Fermi age equation
franz.: équation d'âge de Fermi

Alterstheorie. Die A. beschreibt die Abbremsung von Neutronen unter Berücksichtigung der Diffusion, d. h. der Ortsveränderung der Neutronen während des Bremsvorgangs. Die Bremsung erfolgt durch elastische Zusammenstöße mit den Atomkernen. Dabei verliert das Teilchen im Mittel einen bestimmten Bruchteil seiner Energie E. Die A. geht davon aus, daß der stufenweise Energieverlust durch einen kontinuierlichen Energieverlust ersetzt werden kann (s. Abb. 1), so daß

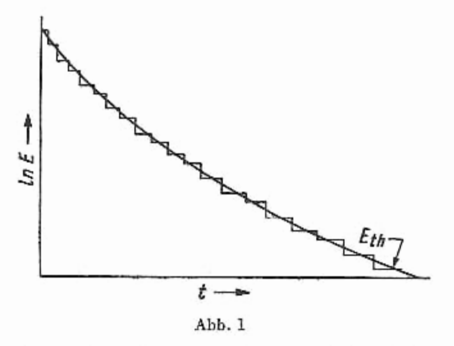


Abb. 1

der Differentialquotient $\mathrm{d}E/\mathrm{d}t$ einen Sinn bekommt. Das ist im allgemeinen erfüllt für die *Neutronenbremsung an Beryllium und Graphit (hier werden 86 bzw. 114 Stöße zur Abbremsung von $E_0 = 2$ MeV auf thermische Energien benötigt). Die Annahme ist dagegen schlecht für die Bremsung an leichtem und schwerem Wasserstoff (18 bzw. 26 Stöße). Die *Bremszeit $t(E_{\mathrm{Kern}})$ beträgt bei leichtem Wasser $1 \cdot 10^{-5}$ s, bei Graphit $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ s. Formelmäßig gilt:

$$t(E) = \int_{E}^{E_0} \frac{\mathrm{d}(\ln E)}{\sum_i \xi_i \sigma_i N_i \cdot v} \tag{1}$$

(ξ_i mittlerer logarithmischer Energieverlust beim Stoß am Atomkern der Sorte i, N_i Zahl dieser Atomkerne in

cm^3, $\sigma_i(E)$ deren Streuquerschnitt). t ist also eine eindeutige Funktion der Energie, auf die das Teilchen abgebremst wurde.

Altérstheorie

Die Zahl der Neutronen im Energieintervall zwischen E und $E - \mathrm{d}E$, die aus einem Volumenelement durch räumliche Diffusion in der Zeiteinheit hinausgelangen, ist

$$- D\, \Delta\Phi(E, \mathfrak{r})\,(-\,\mathrm{d}E) = + \frac{D}{\sum\limits_i \xi_i N_i \sigma_i E} \cdot \Delta q(E, \mathfrak{r})\,\mathrm{d}E\,, \qquad (2)$$

wobei $q(E, \mathfrak{r})$ die *Bremsdichte darstellt, d. i. die Zahl der Neutronen in cm^3, die in der Sekunde auf Energien unterhalb E abgebremst werden. Die Größe q erlaubt, die Zahl der Neutronen, die durch Bremsung in das Energieintervall dE bei E hinein- und herausgelangen, leicht anzugeben.

Der Gewinn des Energieintervalls dE ist einfach

$$q(E) - q(E - \mathrm{d}E)\,. \qquad (3)$$

Im stationären Fall müssen sich Gewinn durch Bremsung und Verlust durch Diffusion gerade kompensieren. Also gilt

$$+ \frac{D}{\sum\limits_i \xi_i N_i \sigma_i E}\, \Delta q(E, \mathfrak{r}, t) + \frac{\partial q}{\partial E} = 0\,. \qquad (4)$$

Ersetzt man die Ableitung $\partial q/\partial E$ durch $\partial q/\partial t$ mit Hilfe von (1) und mißt dann die Bremszeit t in Einheiten $v \cdot D$, so daß $\mathrm{d}t = \mathrm{d}\tau/v \cdot D$, so entsteht (4) in besonders einfacher Form

$$\Delta q = \frac{\partial q}{\partial \tau}\,, \qquad (5)$$

τ heißt das *Fermi-Alter. Die Gl. (5) ist die Fermische Altersgleichung. Ihre Lösung liefert die Bremsdichte in Funktion des Ortes und der Energie der Neutronen bzw. deren Bremszeit. Für eine punktförmige Quelle an der Stelle $\mathfrak{r}_0$ in einem unendlich ausgedehnten Medium lautet die Lösung

$$q(\mathfrak{r}, \tau) = \frac{\mathrm{e}^{-|\mathfrak{r}-\mathfrak{r}_0|^2/4\tau}}{(4\pi\tau)^{3/2}}\,. \qquad (6)$$

 Man erkennt, daß die Bremsdichte eine Glockenkurve um den Quellpunkt ist, wobei die Steilheit durch das Fermi-Alter, also die Neutronenenergie, bestimmt ist (s. Abb. 2). Ein kleines τ bedeutet, daß die Neu-

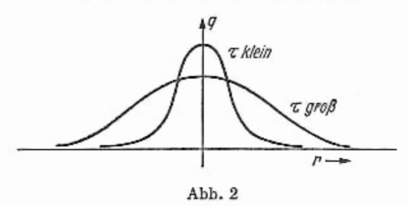


Abb. 2

tronen erst sehr wenig abgebremst wurden. Daher hatten sie noch keine Zeit, in größere Abstände vom Quellort zu diffundieren. [7]

engl.: age theory

franz.: théorie du ralentissement continu

Lit.: S. Glasstone u. M. C. Edlund, Principles of Nuclear Reactor Theory, D. van Nostrand Comp., New York, 1952. – R. L. Murray, Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1957. – H. Grümm u. K. H. Höcker, Ergeb. der exakten Naturwiss. 30, Springer, Berlin, 1958.

Alterung, s. Aushärtung.

engl.: aging

franz.: vieillissement

Aluminium, Leichtmetall der Dichte 2,7, Ordnungszahl 13, Atomgewicht 26,97, Schmelzpunkt 660,2 °C, Siedepunkt 2327 °C, Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen 0,215 barn/Atom. Kristallstruktur: kubisch flächenzentriert. – A. wird im Reaktorbau im allergrößten Maße als *Strukturmaterial verwendet. Reines A. kann man gegenüber Wasser bis etwa 150 °C benutzen, gegen Luft und CO_2 ist es bis fast zum Schmelzpunkt beständig, gegenüber flüssigen Metallen versagt es dagegen. In Wasser tritt oberhalb etwa 150 °C eine Korngrenzenkorrosion auf, die zum baldigen Ausfall der Probe führt. Aluminiumlegierungen, die bis etwa 250 °C gegen Wasser beständig sein sollen, erhält man durch Legieren mit geringen Mengen Eisen und Nickel. Zum Beispiel: 0,3–1 % Fe, 0,5–2,5 % Ni, Rest Al. Die Strahlenschäden im A. bei Verwendung im Reaktorkern sind gering. Sie beschränken sich auf harmlose Änderungen der mechanischen

Eigenschaften, die die Verwendbarkeit des Metalls nicht beeinträchtigen. [20]
engl.: aluminum
franz.: aluminium

Aluminium 28, radioaktives Isotop, das im wesentlichen in den Bestrahlungsbehältern aus Aluminium bei der Neutronenaktivierung von Substanzen entsteht. Da die Aktivität des Al^{28} mit 2,27 min Halbwertszeit abklingt, sind die Bestrahlungsbehälter nach einer Stunde Lagerzeit praktisch frei von Al^{28}-Aktivität. Die dennoch verbliebene Aktivität der Bestrahlungskapseln beruht größtenteils auf aktivierten Verunreinigungen des Aluminiums.
Al^{28} besitzt eine harte β- und γ-Strahlung von $\beta = 2{,}87$ MeV und $\gamma = 1{,}78$ MeV. [16]

Aluminiumfluorid (AlF_3) bildet sich als unlöslicher Rückstand bei der Auswaschung und Auflösung von Plutoniumfluorid mittels einer wäßrigen Aluminiumnitratlösung. Die Reinigung dieses Aluminiumfluoridniederschlages von Pu-Resten ist problematisch. [22]
engl.: aluminumfluoride
franz.: fluorure d'aluminium

Aluminiumnitrat [$Al(NO_3)_2$]. Es beeinflußt äußerst günstig den *Verteilungskoeffizienten bei der Extraktion von Uranylnitrat und Plutoniumnitrat aus wäßrigen Lösungen durch Hexon (Methyl-isobutyl-keton), TBP (Tributylphosphat) und DBC (Dibutylcarbinol). [22]
engl.: aluminumnitrate
franz.: nitrate d'aluminium

Amberlite, sind organische Harz-Ionenaustauschermedien der amerikanischen Fa. Rohm & Haas, sie finden breite Anwendung bei Kernbrennstoffaufbereitungsprozessen, und zwar zur Entseuchung radioaktiver Abfall-Lösungen und der Anreicherung von Uran, Plutonium und Thorium aus sehr verdünnten wäßrigen Lösungen. Neben Produkten der Fa. Rohm & Haas werden die der Fa. „Dow Chemical Corp." (Dowex) als besonders beständig gegenüber radioaktiver Strahlung empfohlen. [22]

Americium, eines der künstlich durch Kernumwandlung hergestellten Transurane; Ordnungszahl 95; che-

misches Symbol Am. Das erste direkt gewonnene Isotop hat die Massenzahl 241. Es wurde während des 2. Weltkriegs von Seaborg durch Beschießung von Uran 238 mit α-Teilchen von 40 MeV Energie aus dem Zyklotron erhalten, wobei zuerst Plutonium 241 entsteht, welches unter Aussendung von β-Strahlen radioaktiv in das Am zerfällt:

$$^{238}_{92}\mathrm{U}\ (\alpha, n)\ ^{241}_{94}\mathrm{Pu} \xrightarrow{\beta} {}^{241}_{95}\mathrm{Am}\,.$$

Das ^{241}Am ist α-radioaktiv mit einer Halbwertszeit von ca. 500 Jahren. Durch Neutronenbeschuß konnten aus ihm noch weitere Isotope gewonnen werden, bis hinauf zum ^{246}Am. Andererseits hat man inzwischen auch leichtere Isotope mit Massenzahlen von 237 bis 240 gefunden. Das ^{241}Am ist heute der wichtigste Ausgangsstoff für die Herstellung höherer Transurane. [1]

engl.: americium

franz.: americium

Lit.: O. Hahn, Künstliche neue Elemente, Chemie, Weinheim, 1948. – Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen, I. Bd., 5. Teil, Springer, Berlin, 1952, 6. Aufl.

Amersham. Standort des radiologischen Zentrums der britischen Atomenergiebehörde in Buckinghamshire. Gehört zum Atomforschungszentrum *Harwell. [24]

Ammoniumcitrat $[C_6H_5O_6(NH_4)_3]$ wird bei der Brennstoffaufbereitung als Auswaschlösung zur Auswaschung seltener Erden aus Ionenaustauschern bei $p_H = 3{,}2$ angewandt. [22]

engl.: ammoniumcitrate

franz.: citrate d'ammonium

Ammoniumdiuranat $[(NH_4)_2U_2O_7]$ entsteht als Niederschlag bei der Neutralisation von salpetersaurer Uranylnitratlösung. Dieses Ammonsalz wird bei der *Brennstoffaufbereitung erhitzt und zu U_2O_8 kalziniert. [22]

engl.: ammoniumdiuranate

franz.: diuranate d'ammonium

Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) findet bei der *Brennstoffaufbereitung gelegentlich als Salzzuschlag (*engl.: salting agent*) beim Hexon-Extraktionsprozeß Verwendung. Es wird vom Aluminiumnitrat in seiner

Wirkung, den *Verteilungskoeffizienten

$$C_1 \text{ Org}/C_2 \text{ a q}$$

zu vergrößern, weit übertroffen. [22]
engl.: ammoniumnitrate
franz.: nitrate d'ammonium

Amplidyne, englische Bezeichnung für einen rotierenden magnetischen oder dynamoelektrischen Verstärker. Wird in Servomechanismen, besonders an Regel- und Steuergeräten, wegen seiner hohen Leistungsverstärkung oft benutzt. Einstufiger Verstärker mit starker positiver Rückkopplung. [6]
engl.: amplidyne *franz.: amplidyne*

Amplitudenfrequenzgang, Abhängigkeit der Amplitudenverstärkung eines *Übertragers von der Frequenz der zu übertragenden harmonischen Schwingung der Eingangsgröße. Der A. stellt den Betrag des allgemeinen komplexen *Frequenzganges dar. Seine große Bedeutung beruht darauf, daß er einerseits besonders einfach zu messen ist und andererseits wegen des allgemeinen Zusammenhanges zwischen Amplituden- und Phasenfrequenzgängen in vielen Fällen bereits den vollständigen komplexen Frequenzgang liefert. Die Messung des A. stellt deshalb das an Reaktoranlagen am häufigsten benutzte experimentelle Verfahren zur Beurteilung von Übertragereigenschaften dar. [9]
engl.: amplitude frequency plot
franz.: courbe de réponse (en fonction de la fréquence)
Lit.: R. C. Oldenbourg, H. Sartorius, Dynamik selbsttätiger Regelungen, R. Oldenbourg, München, 1951. – W. Oppelt, Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge, Verl. Chemie, Weinheim, 1956.

Amplitudenfunktion, 1. die Abhängigkeit der Amplitude eines Schwingungsvorgangs von Orts- und Zeitkoordinaten. Bei vielen Schwingungsvorgängen ist diese Funktion eine Konstante, vielfach dagegen auch nicht.
Es möge eine gedämpfte eindimensionale Schwingung vorliegen. Deren mathematische Darstellung erfolgt im einfachsten Fall so:

$$x = C \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos \omega t$$

(t Zeit, x Abstand von der Ruhelage, C, ω und α Konstanten). Die Schwingung erreicht maximale

Schwingungsweite zu den Zeitpunkten $t = 2\pi n/\omega$, wobei n die Reihe der positiven ganzen Zahlen durchläuft. Der Betrag dieser Schwingungsweite (Amplitude) ist eine Funktion von t *gemäß* $C \cdot e^{-\alpha t}$. Diese Funktion heißt A. In diesem Fall nimmt also die Amplitude mit der Zeit exponentiell ab.
Bei gekoppelten Schwingungen treten periodisch veränderliche A., Schwebungen, auf. Der Vorgang ist darzustellen durch

$$x = C \cdot \cos \omega' t \cdot \cos \omega t \, .$$

Wenn man die Amplitudenveränderung sinnvoll von einem eigentlichen Wellenvorgang abtrennen will, muß $\omega' \ll \omega$ sein, d. h. die Amplitude verändert sich langsam gegenüber dem Zustand der schwingenden Größe (Massenpunkt usw.). Eine ähnliche Bedingung gilt auch bei gedämpften Schwingungen. Auch da darf α relativ zu ω eine gewisse Größe nicht überschreiten.
2. Unter A. wird in der Quantenmechanik gelegentlich die zeitunabhängige ψ-Funktion verstanden, also A. $= \psi(x, y, z)$ im Gegensatz zur Wellenfunktion $\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) \cdot e^{i\omega t}$. [7]
engl.: amplitude function
franz.: fonction d'amplitude

Amplituden-Modulation, s. Modulation.
engl.: amplitude modulation
franz.: modulation d'amplitude

Ampullenöffner, Fernbedienungsglasschneider mit entsprechenden Haltevorrichtungen zum Öffnen von *Bestrahlungsampullen. [16]
engl.: ampoule opener *franz.: brise-ampoules*

AMSCO 123-15, amerikanische Fabrikatbezeichnung für ein oft verwendetes Verdünnungsmittel für Tributylphosphat (TBP); es hat eine Dichte von 0,788 g/cm³, eine „Seybold-Viskosität" (s) bei 100 °F (= 38 °C) von 31 s. Es ist aus 83 % Paraffinen, 11 % Aromaten und 6 % Naphtenen zusammengesetzt. Seine Entflammtemperatur liegt bei 62 °C (= 143 °F). Es ist nicht toxisch, beeinflußt nicht die Korrosionsgeschwindigkeit von Edelstahl, ist sauber, besitzt bei intensiver, radioaktiver Bestrahlung eine relativ gute Stabilität. Es ist sehr reaktionsträge und hat eine ge-

ringe chemische Affinität Spaltprodukten gegenüber. [22]

Lit.: J. R. Flanary, Peaceful Uses of Atomic Energy, Beitrag P 539, Genf, 1955. – Bruce, Fletcher, Hyman, Katz, Progress in Nuclear Energy, Series III, Process Chemistry, Bd. 1, Pergamon Press, London, 1956.

Anaemie nennt man die Herabsetzung des Hämoglobingehaltes (roten Blutfarbstoffes) in der Volumeneinheit Blut bei gleichzeitiger Verminderung der Zahl der roten Blutkörperchen. [28]
engl.: anaemia *franz.: anémie*

anaërob bedeutet Leben ohne Sauerstoff; Anaërobier sind Mikroben, die ohne Sauerstoff leben können. Man verwendet den Ausdruck a. aber auch für alle Versuchsbedingungen, bei denen unter Ausschluß von Sauerstoff gearbeitet wird (fermentative Vorgänge, Zellsuspensionen oder Zellkulturen).
Dabei sind fakultativ und obligat a.e Keime zu unterscheiden. Die für den Menschen wichtigste Gruppe ist die der sog. a. Sporenbildner. Zu ihnen gehört der Tetanusbazillus, Botulinusbazillus (Fleisch- u. Konservenvergiftung), die Erreger des Gasödems und zahlreiche vor allem eiweißverfaulende Bakterien. [28]
engl.: anaerobic *franz.: anaérobique*

Analogie-Rechenmaschine, ein wichtiges elektronisches Gerät, insbes. zur Lösung von Differentialgleichungen. In der Reaktortheorie dient es insbes. zur Behandlung der zeitabhängigen Probleme (Reaktorkinetik und -dynamik). Im Gegensatz zur Digital-Rechenmaschine, die mit diskontinuierlichen Impulsen arbeitet, werden in der A.-R. physikalische Variable durch kontinuierlich veränderliche elektrische Spannungen dargestellt. Durch geeignete

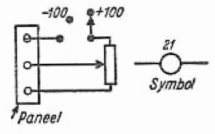


Abb. 1. Potentiometer dienen zur Herstellung definierter Spannungen oder dazu, eine variable Spannung mit einem konstanten Koeffizienten zu multiplizieren. Wenn man die Einstellung des Potentiometers durch einen Servomotor besorgen läßt, kann mit variablen Faktoren multipliziert werden.

Schaltungen können die Spannungen miteinander nach arithmetischen und sonstigen Operationen verknüpft werden. Die Abb. zeigen einige der wichtigsten Schaltelemente und ein einfaches Rechenbeispiel.



Abb. 2. Gleichspannungsverstärker sind eines der Hauptelemente der A. Es sind Verstärkungen in der Größenordnung 10^8 mit guter Linearität ($< 0{,}01\,\%$) erforderlich.

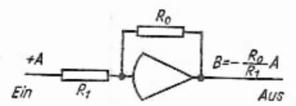


Abb. 3. Schaltung eines Multiplikators, der die Eingangsspannung mit $-R_0/R_1$ vervielfacht. Wird R_0 durch einen Kondensator ersetzt, dann wirkt diese Schaltung als Integrator.

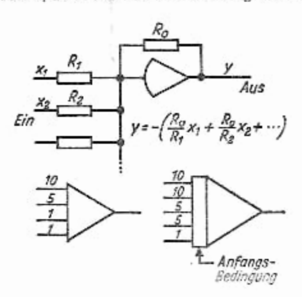


Abb. 4. Additions-Schaltung, darunter das entsprechende Symbol. Unten rechts das Symbol eines Integrators. Die Zahlen geben an, mit welchem Faktor die Eingangs-Spannungen multipliziert werden.

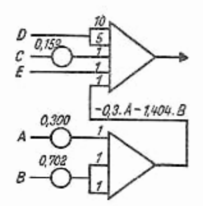


Abb. 5. Beispiel einer Schaltung, die den Ausdruck
$x = 0{,}3 \cdot A + 1{,}404 \cdot B - 0{,}159 \cdot C - 15 \cdot D - E$ bildet.

Der Vorteil der A.-R. gegenüber der Digitalrechenmaschine besteht in der höheren Rechengeschwindigkeit, da die A.-R. ihre Operationen simultan durchführt. Auf der anderen Seite ist die Rechengenauigkeit des Digitalrechners und seine Speicherfähigkeit für Eingangs-Daten größer. Zur Lösung häufig wiederkehrender Probleme ist es oft zweckmäßig, ganze Komplexe eines Reaktors durch eine ständige und spezialisierte A.-R. nachzubilden. Man spricht in diesem Fall von einem Simulator. [13]

engl.: analogue computer
franz.: calculateur analogique

Lit.: Sonderheft Nucleonics 15, No. 5 (Mai 1957). Dort findet sich weitere Literatur.

Analyse, radiometrische. Analysenmethode, bei der die Bestimmung eines chemischen Elementes mit Hilfe von radioaktiven Indikatoren durchgeführt wird, z. B.: Bestimmung einer Silbermenge durch Fällung mit radioaktiven Jodid-Ionen. Durch Adsorption des Jodids an $Fe(OH)_3$ können noch sehr kleine Silbermengen erfaßt werden (bis 10^{-3} %). [3]

engl.: radiometric analysis
franz.: analyse radiométrique

Analyse, thermische. Untersuchung von Vorgängen in Metallen und Legierungen, die mit Wärmetönungen verbunden sind (z. B. Erstarrung, Schmelzvorgang, allotrope Phasenumwandlungen usw.). Dabei wird die Temperatur des Metalles bzw. der Legierung während der Erhitzung oder der Abkühlung in Abhängigkeit von der Zeit beobachtet. Durch die Wärmetönungen (z. B. Schmelzwärme) lassen sich diese Vorgänge als Diskontinuitäten in den entsprechenden Temperatur-Zeit-Kurven erkennen. [4]

engl.: thermal analysis
franz.: analyse thermique

Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkunde, Springer, Berlin, 1950.

Anemometer, Windstärkenmesser. Eines der Grundinstrumente zur Bestimmung der metereologischen Lage. [6]

engl.: anemometer
franz.: anemomètre

A-Neutronen sind Neutronen mit einer solchen Energie, daß sie vom Silber stark absorbiert werden. Der Ausdruck ist veraltet. [7]
engl.: A-neutrons
franz.: neutrons A

Anfahren eines Reaktors bezeichnet das vorsichtige Steigern der Leistung eines Reaktors von sehr kleinen Anfangswerten bis zur Vollast. Im wesentlichen identisch mit *Start. Zum Unterschied von diesem liegt das Hauptaugenmerk dabei auf der kontrollierten Leistungssteigerung statt auf dem Ausgleich der negativen *Abschaltreaktivitäten. Infolgedessen versteht man unter A. e. R. vorwiegend Leistungssteigerungen, bei denen auch die Anfangsleistung gesteuert oder geregelt ist. S. a. Startverlauf. [9]
engl.: start-up
franz.: démarrage

Ångström (Å), Längeneinheit in der Optik und Kristallphysik. 1 Å ist 10^{-8} cm. Früher wurde die Ångströmeinheit an Stelle des heutigen KX verwendet. Das KX ist keine metrische Einheit, sondern ist durch den Wert der Gitterkonstanten von Standardpräparaten bestimmt, mit denen die Röntgen-Wellenlängen gemessen werden. Festsetzung von 1947 ist:

$$1\,\mathrm{KX} = 1000\,\mathrm{X} = 1{,}00202 \pm 0{,}00003\ \text{Å}\,.$$ [26]

Lit.: W. L. Bragg, J. Scient. Instr. 24, 27, 1947.

Anisotropie, Abhängigkeit der chemischen, physikalischen und technologischen Eigenschaften eines Kristalls von der kristallographischen Orientierung. Die A. ist um so größer, je geringer die Symmetrie der Kristallstruktur ist. So wird z. B. die thermische Ausdehnung des rhombischen Alpha-Urans durch drei verschiedene Größen in den drei Achsenrichtungen gekennzeichnet, beim tetragonalen Beta-Uran sind die Ausdehnungskoeffizienten in den beiden gleichwertigen Achsen gleich groß und von dem Wert der 3. Achse verschieden; die thermische Ausdehnung der kubischen Gamma-Modifikation des Urans ist isotrop, d. h. orientierungsunabhängig. – Polykristallines Material verhält sich quasi-isotrop, wenn keine Vorzugsorientierung (Textur) vorhanden ist. [4]
engl.: anisotropism *franz.: anisotropie*

ANL. Abk. für Argonne National Laboratory, Atomforschungslaboratorium der amerikanischen *Atomenergiekommission bei Chicago. [24]

Anlagerungsreaktion, s. Nachtrag.

Anlassen, auf erhöhte Temperaturen bringen. Dabei kann je nach der Art des Werkstoffes, der Höhe der Temperatur und der Dauer des Anlassens eine *Aushärtung (z. B. bei abgeschreckten Aluminium-Kupfer-Legierungen) oder eine Erweichung (z. B. bei gehärtetem Stahl) stattfinden. [4]
engl.: annealing
franz.: recuit

Anregung. Unter A. versteht man die Zufuhr von Energie an ein Molekül, Atom oder einen Kern, wodurch ein höherer Energiezustand bewirkt wird. Ein Molekül, Atom oder Kern in einem höheren Energiezustand heißt „a n g e r e g t". A. der Elektronenhülle erfolgt im wesentlichen durch Elektronenstoß oder Lichtstrahlung. Atomkerne können bei mannigfachen Kernreaktionen in einen angeregten Zustand übergeführt werden. Sie geben die Anregungsenergie in der Regel innerhalb ca. 10^{-14} s durch γ-Strahlung wieder ab, s. Anregungszustand. [1]
engl.: excitation *franz.: excitation*
Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1957. – W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

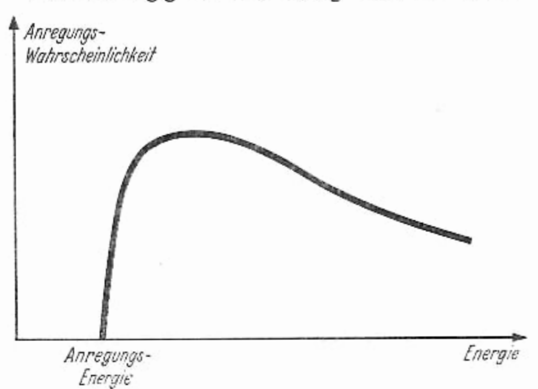
Anregungsenergie ist diejenige Energie, welche zur Anregung eines bestimmten Energieniveaus eines Atoms (Moleküls, Ions, Kerns) notwendig ist. Die A. ist also die Differenz des entsprechenden Energieniveaus und der Energie des Grundzustands. [1]
engl.: excitation energy
franz.: énergie d'excitation

Anregungsfunktion, s. Anregungswahrscheinlichkeit.
engl.: excitation function
franz.: fonction d'excitation

Anregungsspannung, die in eV ausgedrückte *Anregungsenergie. [7]
engl.: excitation voltage
franz.: tension d'excitation

Anregungswahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die Anhebung des energetischen

Zustandes eines Systems als Folge einer Wechselwirkung mit irgendwelchen Partikeln oder Strahlungen erfolgt (s. Anregung). Die A. ist natürlich für jedes Energieniveau verschieden. Sie hängt außerdem von Art und Energie des stoßenden Teilchens ab. Diese Abhängigkeit wird häufig auch als Anre-



Die Anregungsfunktion

gungsfunktion bezeichnet. Den qualitativen Verlauf zeigt die Abb. Unterhalb der Anregungsenergie gibt es keine Anregung. Nach Überschreiten der Anregungsenergie steigt die A. steil an, durchläuft ein Maximum (in der Gegend 10 bis 100 V) und nimmt bei weiterem Ansteigen der Elektronenenergie wieder langsam ab. [1]

engl.: excitation probability

franz.: fonction (probabilité) d'excitation

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1957.

Anregungszustand, s. Nachtrag.

Anreicherung. Das in der Natur vorkommende Uran enthält zu 0,7 % das spaltbare Isotop Uran 235, während die überwiegende Masse von dem mit thermischen Neutronen nicht spaltbaren Uran 238 gebildet wird. Es ist möglich, mit diesem Natururan einen heterogenen thermischen Reaktor zu bauen, wenn man einen guten Moderator verwendet. Jeder Natururanreaktor ist jedoch recht groß und legt dem Konstrukteur beträchtliche Beschränkungen im Einbau von (neutronen-

absorbierenden) Halterungsmaterialien und Kühlrohren auf, da das Uran 238 bereits beachtliche Mengen an Neutronen absorbiert. Ein Reaktor, in dem die spaltbare Substanz relativ zum U 238 vermehrt (angereichert) ist, hat daher viel mehr Möglichkeiten. Man versteht unter A. die Anhebung des Prozentsatzes eines interessierenden Isotops etwa mittels einer Isotopentrennanlage. Z. B. versteht man unter „10 % angereichertem Uran" solches, das auf 90 Uran 238-Kerne 10 Uran 235-Kerne enthält (Anreicherungsgrad = 10 %). Man kann praktisch reines U 235 herstellen (Anreicherungsgrad 100 %). Entsprechendes gilt für andere Elemente, z. B. A. des für Neutroneneinfang wichtigen ^{10}B im natürlichen *Bor. – Mitunter gebraucht man das Wort A. auch vom Standpunkt des Reaktors, bei dem es in erster Linie nur auf das spaltbare Material, gleichgültig welcher Art, ankommt. Man spricht also auch von einer A., wenn man zum Natururan Plutonium 239 gibt, das beim Betrieb des Reaktors auf Uranbasis entsteht und durch chemische Trennverfahren zu gewinnen ist. [7]
engl.: enrichment *franz.: enrichissement*

Anreicherungsfaktor. Der A. eines Isotopentrennverfahrens ist durch den Quotienten zwischen dem Konzentrationsverhältnis des angereicherten Produktes und dem natürlichen Konzentrationsverhältnis gegeben:

$$q = \frac{(C_1/C_2)_{\text{angereichert}}}{(C_1/C_2)_{\text{natürlich}}} .$$

Beim Hintereinanderschalten von n Einzeltrennprozessen mit dem A. q ist der Gesamt-A. $A = q^n$. Es ist zwischen dem Gleichgewichts-A. q und dem effektiven A. q_{eff} zu unterscheiden, der sich bei endlicher Produktion einstellt. [14]
engl.: enrichment factor
franz.: facteur d'enrichissement

Ansprechvermögen von Zählrohren. Im allgemeinen wird angenommen, daß ionisierende Strahlung im Inneren eines Zählrohres mehrere Ionenpaare produziert und damit einen Impuls auslöst. Im Falle schwach ionisierender Teilchen, wie sie z. B. in der kosmischen Strahlung vorkommen, und bei kleinem Absorptions-

vermögen der Gasfüllung muß jedoch das A. kontrolliert werden.

Das Ansprechvermögen wird meist in Prozenten angegeben. [6]

engl.: sensitivity *franz.: sensibilité*

Ansprechwahrscheinlichkeit eines Strahlungsmeßgerätes ist der Bruchteil der Quanten oder Teilchen, die in das empfindliche Volumen des Gerätes eintreten und dort einen Zählimpuls bewirken. Sie ist von Strahlungsart und Energie weitgehend abhängig. Sie ist bei Zählrohren für Gammastrahlen allgemein gering, für Strahlen schwerer Teilchen dagegen fast 100 %. [6]

engl.: counter efficiency

franz.: sensibilité, rendement

Anstiegszeit. Definiert als die Zeit, die vergeht, bis Ausgangsspannung oder Strom von 10 % auf 90 % des Endwertes ansteigen, wenn an den Eingang ein Spannungssprung gegeben wird. [6]

engl.: rise time *franz.: temps de montée*

Anstoßatom. Ein Atom in einem Festkörper, das durch einen Stoß eines energiereichen Teilchens (Neutron, Proton, Spaltprodukt) aus seinem Gitterplatz herausgestoßen wird und sich durch den Festkörper bewegt, wobei es bei genügend großer Energie selbst wieder andere Anstoßatome erzeugen kann. Leichte Atome können auch durch energiereiche Elektronen aus ihren Gitterplätzen entfernt werden. [4]

engl.: knocked-on atom *franz.: atome expulsé*

Lit.: K. Lintner u. E. Schmid, Erg. ex. Nat. wissensch. 28, 302, 1955.

Anthrazenkristalle werden für *Szintillationszähler verwendet. Ein A. emittiert bei 4400 Å, Abklingzeit $3 \cdot 10^{-8}$ s. Für Betastrahlung herrscht Linearität von 125 bis 1900 keV. 2 mm dicke Kristalle geben auch bei Messung von Gammastrahlung befriedigende Ausbeute. [6]

engl.: anthracene crystal

franz.: cristal d'anthracène

Antikoinzidenzkreis, elektronische Schaltung mit zwei Eingängen und einem Ausgang. Ein Impuls an einem der Eingänge erzeugt nur dann einen Ausgangsimpuls, wenn nicht gleichzeitig ein Impuls auf den

anderen Eingang geleitet wird. A.e werden z. B. in Antikoinzidenz-Ringzählern zur Messung kleinster Aktivitäten verwendet. Hierbei wird der Zähler mit einem Ring von Zählrohren umgeben und in Antikoinzidenz geschaltet. Dadurch wird die Strahlung von außen, die sowohl im Zähler als auch in den Zählrohren einen Impuls auslöst, nicht registriert. S. a. Koinzidenz. [17]
engl.: anticoincidence circuit
franz.: circuit d'anticoïncidence

antikommutativ sind Größen und Rechenoperationen, wenn gilt: $A \cdot B = -B \cdot A$. Derartige Größen (*Operatoren) sind also nicht in gewöhnlicher Weise miteinander vertauschbar. [7]
engl.: anticommutative *franz.: anticommutatif*

Antikommutator heißt ein Operator von der Form $A \cdot B + B \cdot A$, wobei A und B selbst Operatoren (z. B. Matrizen) sind. Im Gegensatz dazu steht der Kommutator $A \cdot B - B \cdot A$. Auf Grund von Vertauschungsrelationen kommen diesen Operatoren bestimmte Werte zu. [7]
engl.: anticommutator *franz.: anticommutateur*

Antimaterie, s. Antiproton.

Antimon 122, 124 und 125

Antimon 122, 124 und 125, drei in der Isotopentechnik gebräuchliche radioaktive Isotope des Metalls Antimon. Sb^{122} zeichnet sich durch hohe erreichbare spezifische Aktivität, Sb^{124} durch sehr harte Gammastrahlung, deren Photoeffekt an Beryllium bereits für eine brauchbare Antimon-Beryllium-Neutronenquelle genügt, und Sb^{125} durch lange Halbwertszeit aus. Im allgemeinen werden die Isotope zur radioaktiven *Markierung und in der Radiochemie benutzt. Sämtliche Isotope erzeugt man durch Bestrahlung mit lang-

rad. Isotop	bestr. Isotop	Halbwertszeit	Strahlung
Sb^{122}	Sb^{121}	2,8 Tage	β, γ, K
Sb^{124}	Sb^{123}	60 Tage	β, γ bis zu 2,11 MeV
Sb^{125}	Sn^{124}	2,7 Jahre	β, γ, e

 samen Neutronen. Das dabei gewonnene Sn^{125} verwandelt sich durch Betazerfall in Sb^{125}. [16]
engl.: antimony *franz.: antimoine*

Antimon (Sb), trägerfreies, kann man aus neutronenbestrahltem Zinn isolieren. Man löst die Zinn-Antimon-Mischung in 4 m HCl auf, schickt die Lösung über Zinn-Granula, wobei sich das A. in einer feinen Schicht auf den Granula abscheidet. Diese feine Schicht wird mechanisch entfernt und in HCl aufgelöst. Das A. wird mittels Cu_2S kopräzipitiert. [22]
engl.: carrier-free antimony *franz.: antimoine*
Lit.: A. F. Rupp, The Preparation of Radioisotopes, Peaceful Uses of Atomic Energy, P/314, Genf, 1955.

Antimonpentafluorid (SbF_5) ist ein wirksamer Fluoridionakzeptor. Es wird daher bei der *Brennstoffaufbereitung als Katalysator der Uran-Auflösung in Bromtrifluorid verwendet. [22]
engl.: antimony-pentafluoride
franz.: pentafluorure d'antimoine

Antimonsulfid (Sb_2S_3) eignet sich neben As- und Cd-Sulfid zur kopräzipitativen Fällung kolloidaler Nitrosyl-Ruthenium-Verbindungen. [22]
engl.: sulfide of antimony
franz.: sulfure d'antimoine

Antineutron, das Antiteilchen zum Neutron, das sich von diesem vor allem durch das umgekehrte Vorzeichen seines magnetischen Moments unterscheidet. A.n, die beim Durchgang von Antiprotonen durch Materie durch Ladungsaustausch entstehen, können mittels der Energiefreisetzung bei ihrer Vernichtung zusammen mit Neutronen beobachtet werden (erstmals 1956). [1]
engl.: antineutron *franz.: antineutron*

Antineutrino, das Antiteilchen zum Neutrino. Das A. wurde theoretisch eingeführt, um das Paar Neutrino-A. nach der Diracschen Theorie behandeln zu können. Es unterscheidet sich nur in gewissen Symmetrieeigenschaften vom Neutrino. [1]
engl.: antineutrino *franz.: antineutrino*

Antiproton, das Antiteilchen zum Proton, das die gleiche Masse, aber eine negative Elementarladung besitzt. Die Existenz des A. ist bereits seit der Diracschen Theorie der Elektron-Positron-Paare

(1928) vermutet worden, ebenso wie die des Positrons. Während aber das Positron schon 1932 experimentell sichergestellt wurde, hat der sichere experimentelle Nachweis des A.s bis 1955 auf sich warten lassen. Er gelang durch die künstliche Erzeugung von A.n mittels Protonenstrahlen von 4,5 bis $6{,}2 \cdot 10^9$ eV aus dem Bevatron in Berkeley, nachdem vorher schon Teilchenspuren aus der kosmischen Strahlung eine Deutung als A.-Spuren nahegelegt hatten. Da bei dem Auftreten extrem energiereicher Protonstrahlen auf Materie auch eine große Zahl von π-Mesonen sowie schwerere Mesonen und Hyperonen entstehen, ist es – auch nach der magnetischen Trennung der negativen von den positiven Teilchen – schwierig, die A.n unter den vielen anderen Teilchen herauszufinden. Dies ist nur unter Anwendung einer sehr ausgeklügelten Zähltechnik gelungen. Beim ersten Versuch sind ca. 60 A.n neben fast einer halben Million negativer π-Mesonen festgestellt worden.

Die A.n entstehen als Proton-A.-Paare. Solche Paare zerstrahlen wieder (in erster Linie) unter Bildung von π-Mesonen. Für sich allein müßte das A., genau wie das Positron, beständig sein. Es wären daher „Antiatome" denkbar, deren Kerne aus A.n und Antineutronen und deren Hülle aus Positronen bestehen. Sie könnten eine „Antimaterie" aufbauen, die für sich allein beständig wäre, bei Berührung mit gewöhnlicher Materie jedoch sofort zerstrahlen würde. [1]

engl.: antiproton

franz.: antiproton

Lit.: Physical Review, Bd. 100, S. 947, 1955.

Antisymmetrie. Man spricht von A. mathematischer und physikalischer Größen, wenn eine Symmetriebeziehung, verkoppelt mit einem Vorzeichenwechsel, besteht; z. B. ist eine Funktion $f(x, y)$ antisymmetrisch, wenn gilt $f(x, y) = -f(y, x)$. Weitere Beispiele sind die antisymmetrische Eigenfunktion und die antisymmetrische *Matrix. [7]

engl.: antisymmetry

franz.: antisymétrie

Antiteilchen. Nach der 1928 von Dirac aufgestellten Theorie des Elektrons sollte es eine zweite Art

von Elektronen geben, die sich von den gewöhnlichen durch umgekehrte Ladung (positive statt negative) und – im Bezug auf den Spin – umgekehrtes magnetisches Moment unterscheiden. Dieses hypothetische Teilchen, das Positron, wurde 1932 tatsächlich aufgefunden. Der Erfolg der D i r a c schen Theorie gab zu der Vermutung Anlaß, daß es noch weitere ähnliche Teilchen-Paare gibt. Das in diesem Sinn zu einem Teilchen zugeordnete Zwillingsteilchen nennt man A. Experimentell sind inzwischen weitere Beispiele von A. aufgefunden worden: das Paar Proton-Antiproton, das Paar Neutron-Antineutron und wahrscheinlich gewisse Paare von Mesonen gleicher Masse und entgegengesetzter Ladung (K-Mesonen). [1]
engl.: antiparticle
franz.: antiparticule

Antrieb. Im englischen versteht man unter d r i v e Aggregate und Vorrichtungen zum Antrieb von beweglichen Teilen und Maschinen, z. B. von Kontrollstäben, Ventilen oder Pumpen.
Da Reaktorkreisläufe oft unter hohem Überdruck stehen und sehr hohe Ansprüche an Dichtheit gestellt werden, sind bei der Konstruktion von Antriebsmechanismen bedeutende technische Probleme zu überwinden. [8]
engl.: drive
franz.: commande

Apparatebau, chemischer, ist die Konstruktionslehre von den Maschinen und *Reaktionsapparaten, die in der Verbrauchsgüterindustrie in außerordentlich großer Vielfalt zur Be- und Verarbeitung von Stoffen mit dem Ziel, die ungeheure Vielzahl von Verbrauchsgütern zu erzeugen, verwendet werden. Sie verhält sich zur *Verfahrenstechnik etwa wie die Konstruktion der Kraftmaschinen zur Thermodynamik. Die konstruktiven Ansprüche im ch. A. gehen oft weit über diejenigen im „klassischen“ Maschinenbau hinaus (Unwucht in Zentrifugen; Beanspruchungen durch extrem hohe Drucke und Temperaturen; chemischer Angriff in Reaktionsgefäßen durch die Reaktionsstoffe) und stellen daher große Anforderungen an das Wissen und die Erfahrung des *Verfahrensingenieurs. Ein auf die An-

forderungen der Kerntechnik abgestellter ch. A. umfaßt wegen der zur Durchführung von technischen Kernprozessen erforderlichen vielfältigen *Grundverfahren (von der Erzaufbereitung über die Herstellung von Spaltstoffelementen oder Spaltstofflösungen und den Wärmeaustausch im Kernreaktor bis zur Aufbereitung erschöpfter Spaltstoffe und des radioaktiven Abfalles) praktisch alle bekannten Apparaturen der Verbrauchsgüterindustrie, wobei jedoch besondere, z. T. kernphysikalisch bedingte, meist erschwerende Anforderungen gestellt werden (z. B. extrem hohe Korrosionsbeständigkeit, um Spurenverunreinigungen zu verhüten; betriebssichere Handhabung radioaktiver, d. h. strahlender, also das Bedienungspersonal gefährdender Stoffe u. a.). [2]
engl.: chemical engineering
franz.: construction d'appareils chimiques,
génie chimique

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. – E. Berl, Chemische Ingenieurtechnik, Berlin, 1935. – J. H. Perry, Chemical Engineers Handbook, 3. Aufl., New York, 1950.

Appleton-Hartree-Formel, s. Wellen, elektromagnetische, im Plasma.

APPR. Abk. für das von der amerikanischen Armee geplante kleine transportable Atomkraftwerk (Army Package Power Reactor), das im Dezember 1954 in Auftrag gegeben wurde. Entwurf: Oak Ridge Laboratory. [24]

Aquadag, Handelsname einer wäßrigen Emulsion kolloidalen Graphites. Dient zur Herstellung dünner, leitender Graphitüberzüge und hat vorzügliche Vakuumeigenschaften. [6]

Arbeitsfaktor, auch Beschäftigungsfaktor. Beim Strahlenschutz der Teil der gesamten Arbeitszeit pro Woche (zu 48 Stunden), während dessen das Personal sich in Räumen befindet, in denen es Strahlengefahren ausgesetzt ist. [24]
franz.: pourcentage hebdomadaire d'exposition

Arbeitsgemeinschaft für Kerntechnik, s. AfK.

ARE. Abk. für Arbeitsgemeinschaft der Regionalen

Elektrizitätsversorgungsunternehmen in Deutschland. [24]

Argonaktivierung. Das in der Luft zu 1,3 % enthaltene ^{40}A wird durch Neutronenstrahlung aktiviert. Es entsteht ^{41}A, das unter Aussendung von β- und γ-Strahlung mit einer Halbwertszeit von 109 min zerfällt. Der Wirkungsquerschnitt für die Aktivierung pro Atom ^{40}A durch 2200 m s^{-1}-Neutronen beträgt 0,53 barn, pro Gramm (Normal-) Luft ist er $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ $cm^2\,g^{-1}$. [17]
engl.: argon activation franz.: activation de l'argon

Argonne National Laboratory. Atomforschungszentrum der amerikanischen Atomenergiekommission in Lemont bei Chicago. Der Betrieb des Laboratoriums liegt in Händen der Universität von Chicago. [24]

Arsen 76 und 77, durch Bestrahlung von natürlichem Arsen mit langsamen Neutronen erhält man als einziges in der Isotopentechnik brauchbares radioaktives Isotop das As^{76}. Es zerfällt mit 26,5 Stunden Halbwertszeit unter Aussendung von β- und γ-Strahlung von teilweise großer Durchdringungsfähigkeit.
As^{77}, ein β,γ-Strahler von 38,7 Stunden Halbwertszeit, wird durch Neutronenbestrahlung von Germanium gewonnen. Hierbei entsteht zunächst Ge^{77}, das sich unter β-Aussendung in As^{77} verwandelt. Die beiden Isotope werden in der Radiochemie und zur *Markierung von Substanzen verwendet. [16]
engl.: arsenic 76 and 77 franz.: arsenic 76 et 77

Arsensulfid, s. Antimonsulfid.
engl.: arsenic sulfide franz.: sulfure d'arsenic

Astatin (auch Astat), radioaktives Element der Ordnungszahl 85. Chemisches Symbol At. Es wurde zuerst künstlich hergestellt (1940 von Corson, McKenzie und Segrè) durch Beschießung von Wismut mit α-Teilchen von 32 MeV aus dem Zyklotron. Das hierbei entstehende Isotop hat die Massenzahl 211. Es wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 7,5 Stunden um, teilweise durch K-Einfang, teilweise durch Aussendung von α-Teilchen. Später wurde noch ein anderes Isotop der Massenzahl 217 in der Neptunium-Zerfallsreihe entdeckt, das eine Halbwertszeit von nur 1/50 s besitzt und ebenfalls α-Teilchen aussendet.
1944 wurde A. von Karlik und Bernert auch in

der Natur in winzigen Mengen nachgewiesen, und zwar als Nebenglied der drei natürlichen Zerfallsreihen. Diese Isotope haben die Massenzahlen 215, 216 und 218 und sind ebenfalls α-radioaktiv. Insgesamt kennt man heute zwölf Isotope des A., von denen aber keines wesentlich langlebiger ist als das zuerst entdeckte.
Chemisch gehört das A. zu den Halogenen, deren letztes Glied es bildet. [1]
engl.: astatine
franz.: astatine
Lit.: O. Hahn, Künstliche neue Elemente, Chemie, Weinheim, 1948. – Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen, I. Bd., 5. Teil, Springer, Berlin, 1952, 6. Aufl.

Äthylenblau-Test. Man verwendet Äthylenblau zur Herstellung definierter Aerosole, mit denen man die Wirksamkeit von Absolutfiltern testet (s. Filter, absolute). [22]
engl.: aerosol-test
franz.: test au bleu d'éthylène

Atmungsfermentkette ist die Folge von Reaktionen, die durch zellgebundene Fermente gesteuert werden, und durch welche H zu H_2O oxydiert wird. Durch diesen Oxydationsvorgang wird Energie in Stufen für den Organismus freigesetzt. Auf jeder Oxydationsstufe ist ein Ferment katalytisch wirksam. Der Vorgang verläuft unter Einbeziehung von Reaktionen am komplexgebundenen Eisen über das autoxydable W a r b u r g sche Atmungsferment und über Cytochrome. [28]
Atmungsferment:
engl.: endogeneous respiration
franz.: chaîne de respirationendogène

Atom ist das kleinste Teilchen eines chemischen Elements, welches noch dessen chemische Eigenschaften repräsentiert. Es gibt also zunächst so viele verschiedene Atomsorten, wie es chemische Elemente gibt, nämlich nach unserer heutigen Kenntnis 102. Allerdings hat sich gezeigt, daß nicht alle A.e eines Elementes exakt gleich sind, sondern daß es mehrere Arten mit etwas verschiedener Masse gibt, die I s o t o p e des betreffenden Elementes. Erst die A.e eines Isotops sind untereinander völlig gleich.
Das A. ist nicht, wie sein Name besagen soll, unteilbar, sondern aus einem positiv geladenen Kern und einer

Hülle negativer Elektronen (s. Atombau) zusammengesetzt. Der Charakter eines A.s wird völlig verändert, wenn ein Eingriff in seinen Kern vorgenommen wird (s. Kernumwandlungen).

Der „Durchmesser" eines A.s (s. Atomradius) kann nur ungefähr angegeben werden, da die Elektronenhülle nach außen nicht scharf abgegrenzt ist. Er geht von etwa 0,8 Å (Ångström-Einheit = 10^{-8} cm) bei den kleinsten (Wasserstoff, Bor, Kohlenstoff) bis nahezu 3 Å bei den größten (Cäsium, Francium).

Die Masse der A.e ist sehr genau bekannt. Sie beträgt beim leichtesten, dem normalen Wasserstoffatom, $1{,}6733 \cdot 10^{-24}$ g. Für irgendein anderes A. erhält man die absolute Masse, indem man sein Atomgewicht (in der chemischen Skala) mit $1{,}6602 \cdot 10^{-24}$ g (in der physikalischen Skala mit $1{,}6598 \cdot 10^{-24}$ g; s. ME) multipliziert. Diese Zahl stimmt deswegen nicht exakt mit der Masse des Wasserstoffatoms überein, weil dieses nicht exakt das Atomgewicht 1 hat, sondern nach Definition in der chemischen Skala 1,00786, in der physikalischen Skala 1,00814.

Die Zahl der A.e bezieht man zweckmäßig nicht auf 1 g, sondern auf 1 Grammatom, also z. B. 1 g Wasserstoff, 16 g Sauerstoff, 207 g Blei usw. Die Zahl der A.e je Grammatom ist für alle Elemente, gleichgültig in welchem Aggregatzustand sie sich befinden, gleich groß, nämlich gleich der Loschmidt-Zahl $6{,}025 \cdot 10^{23}$. [1]

engl.: atom

franz.: atome

Atom, heißes. Hochangeregtes Atom (oder Molekül), dessen Energie den Energieinhalt der umgebenden Atome stark überragt. [18]

engl.: hot atom

franz.: atome chaud

Atomabfall, s. Abfall, radioaktiver.

Atombatterie, erstrebt die direkte Umwandlung (Konvertierung) radioaktiver Strahlungsenergie in elektrische Energie. Seit 1945 wird dies systematisch mit der Absicht der Erzeugung eines hohen Wirkungsgrades verfolgt. Die optimale Leistung (in Watt) einer A., gebildet von einem Strahler der Aktivität C [Curie]

und der Strahlungsenergie E [MeV] ist:

Atombatterie

$$W = 5{,}92 \cdot 10^{-3} \cdot E \cdot C\,.$$

Es haben sich folgende Umwandlungsverfahren herausgebildet:

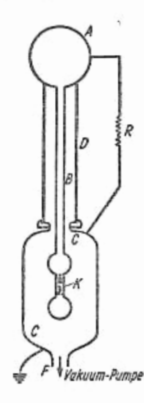


Abb. 1. Schema der direkten Aufladung

A Konduktor
B Präparatträger
C Kollektor
D Isolator
K β-Strahlquelle
R Belastungswiderstand

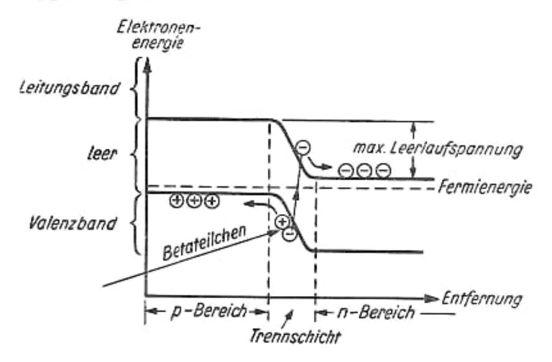
a) D i e d i r e k t e A u f l a d u n g s m e t h o d e besteht darin, daß die geladenen Teilchen eines radioaktiven Präparates von einem gegen das Präparat elektrisch isolierten Kollektor gesammelt werden und diesen dadurch aufladen. Mit Sr-90 erreichte man eine Spannung von 365 000 Volt bei 20 % Wirkungsgrad. Allerdings ist der innere Widerstand solcher Stromquellen mit 10^{14} Ohm sehr hoch.

b) S e k u n d ä r e l e k t r o n e n - A u f l a d u n g s m e t h o d e ist ein Versuch, die geringe Stromausbeute der obigen Methode zu erhöhen, indem man die Anordnung so trifft, daß die Elektronen den Kollektor durchdringen und dabei auf der Austrittsseite ein Vielfaches an Sekundärelektronen auslösen, die entweder einen Konduktor aufladen oder diesen Vorgang wiederholen.

c) T h e r m o k r a f t e l e m e n t. Das radioaktive Präparat dient als Wärmequelle zur Temperaturerhöhung der einen Lötstelle eines Thermoelements. Mit 40 hintereinander geschalteten Lötstellen erreichten J o r d a n und B i r d e n 224 °C Temperaturdiffe-

Atombatterie renz und 9,4 mW Nutzleistung, was einem Wirkungsgrad von 0,2 % entspricht.

d) Sperrschichtelement. Es wird im wesentlichen die Trennschicht zwischen einem p- und einem n-Halbleiter bestrahlt. Die dabei erzeugten Elektronen wandern in das Leitfähigkeitsband des n-Materials und die Elektronenlöcher des Valenzbandes in das p-Material, da die Rückdiffusion wegen des vorhandenen Sperrpotentials erschwert ist. Nach dieser Methode hat man Batterien zum Betrieb kleinerer elektroakustischer Apparate gebaut.



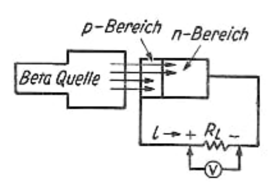


Abb. 2. Prinzipdarstellung des Sperrschichtelements

e) Strahlungsakkumulator. Durch Bestrahlung eines Elektrolyten setzen an den Elektrodenoberflächen chemische Reaktionen ein, die beim Schließen eines äußeren Stromkreises unter Abgabe elektrischer Energie rückgängig gemacht werden. Mit einem Elektrodenpaar aus Graphit und Blei in einem Chloroform-Alkohol-Elektrolyten erhielt man einen Wirkungsgrad von 0,9 %.

f) Kontaktpotentialelement. Lord Kelvin hatte 1897 festgestellt, daß zwei verschiedene Metalle bei Bestrahlung des Luftzwischenraumes eine elektrische Spannung bis zu 1,9 V gegeneinander einnehmen. Diese auf die Kontaktpotentiale zurückgeführte Spannung nutzte zuerst I. V. Kramer zur Stromerzeugung aus. P. E. Ohmart und A. Thomas erreichten bisher einen maximalen Wirkungsgrad von 1 % (Ohmartzelle). [16]

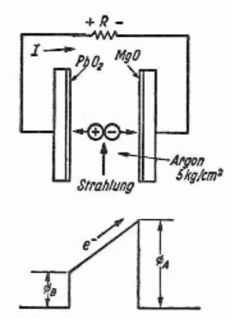


Abb. 3. Prinzip des Kontaktpotentialelements

engl.: atomic energy battery
franz.: pile électrique nucléaire

Lit.: Linder et al., Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. 15, S. 283, Genf, 1955. – Shorr, ibidem, S. 310.

Atombau. Der Aufbau der Atome aus Kern und Elektronenhülle (s. jedoch auch Mesonenatom und Positronium) kann am anschaulichsten im Bild des Bohr-Sommerfeldschen Atommodells beschrieben werden. Man muß sich jedoch hierbei darüber klar sein, daß dieses Modell nur als Bild gewertet werden darf, das nicht in jeder Hinsicht der Wirklichkeit entspricht. Zur genaueren Berechnung von Atomeigenschaften, etwa für die Spektren komplizierterer Atome, ist die Quantenmechanik heranzuziehen, die jedoch keine anschauliche Darlegung des A.s gestattet.

Im Bild des Bohr-Sommerfeldschen Atommodells besteht das Atom aus einem Kern und einer Elektronenhülle, in welcher sich eine bestimmte Anzahl von Elektronen nach Art eines Planetensystems auf bestimmten Bahnen um den Kern bewegen.

Der Kern selbst ist auch für atomare Begriffe außerordentlich klein. Sein „Durchmesser" ist nur von der Größenordnung 10^{-12} cm. Der Kern ist damit im Vergleich zum Atom noch viel kleiner als etwa die Sonne im Vergleich zum Durchmesser des Sonnensystems. Der Kern trägt aber fast die ganze Masse des Atoms. Beim Wasserstoffatom ist das Verhältnis Kernmasse zu Masse der Elektronenhülle (die hier nur aus e i n e m Elektron besteht) 1837 : 1, beim Uranatom sogar rund 4760 : 1. Der Kern ist selbst wieder aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt (s. Kernbau). Er ist positiv elektrisch geladen. Seine Ladung in Elementarladungen ausgedrückt (Kernladungszahl) ist gleich der Ordnungszahl des Atoms. Seine Masse (in Massenzahlen) geht von etwa 1 beim Wasserstoff bis zu 256 bei den schwersten Isotopen des Einsteiniums, Fermiums und Mendeleviums.

Die Elektronen sind innerhalb der Elektronenhülle in „Schalen" angeordnet.

Die Quantentheorie ordnet jedem Elektron im Atom vier Quantenzahlen zu, von denen sich drei auf seine drei Freiheitsgrade im Raum beziehen und die vierte auf den zusätzlichen Freiheitsgrad, welchen jedes Elektron infolge seines Spins hat. Die erste dieser Quantenzahlen, die Hauptquantenzahl n, bestimmt die Schale, in der sich das Elektron befindet. Die K-, L-, M-Schale hat $n = 1, 2, 3$ usw. bis $n = 7$ bei der Q-Schale. Die Unterschalen werden durch die zweite Quantenzahl l bestimmt, die man Bahndrehimpulsquantenzahl nennt. Die zu $l = 0, 1, 2 \ldots$ gehörenden Zustände nennt man s-, p-, d-Zustände. Dabei kann es höchstens zwei s-Elektronen, sechs p-Elektronen, zehn d-Elektronen und vierzehn f-Elektronen bei einem bestimmten n geben. So enthält die K-Schale maximal zwei 1 s-Elektronen, die L-Schale zwei 2 s-Elektronen und sechs 2 p-Elektronen, die M-Schale zwei 3 s-Elektronen, sechs 3 p-Elektronen und zehn 3 d-Elektronen usw. [1]

engl.: atomic structure

franz.: constitution de l'atome, structure atomique

Atombombe, vom Standpunkt der Reaktortechnik aus ein unkontrollierter, stark überkritischer, schneller Reaktor. Der Sprengkörper von A. n besteht aus

praktisch reinem Spaltstoff (U^{235} oder Pu^{239}). Das technische Problem der „Zündung“ der A. besteht darin, die nötige Stoffmenge (in der Größenordnung von 30 kg) momentan räumlich zu vereinigen. Vor der Explosion muß der Spaltstoff räumlich so verteilt sein, daß die Anordnung unterkritisch ist, da sonst jederzeit eine Zündung durch kosmische Strahlung oder spontane Spaltung ausgelöst werden könnte. Ursprünglich wurde die überkritische Masse dadurch hergestellt, daß in die Öffnung eines für sich unterkritischen Blocks ein für sich ebenfalls unterkritischer Pfropfen hineingeschossen wird. Bei neueren A.n wird eine poröse und dadurch unterkritische Masse durch die Explosion einer darum liegenden Schale aus konventionellem Sprengstoff verdichtet und dadurch überkritisch gemacht. Die Wirkung einer A. hängt davon ab, wieviele Spaltstoffatome von der Kettenreaktion erfaßt wurden, bevor die Ladung durch Hitzewirkung zerblasen ist. Wie beim schnellen Reaktor wird auch bei der A. die Reflektorwirkung eines Mantels aus schwerem Material ausgenützt.

Die über Hiroshima abgeworfene A. wird als „Nominalbombe“ bezeichnet. Es wird angenommen, daß in der Nominalbombe rund 1 kg Spaltstoffatome gespalten werden. Die Massenänderung beträgt dabei nur etwa 1 g. Das Energieäquivalent dieses Gramms beträgt $2{,}1 \cdot 10^{13}$ cal, was der Energiemenge entspricht, die bei der Explosion von 20 000 t Trinitrotoluol (TNT) frei wird. Gegenwärtig rechnet man mit A.n mit einem Zerstörungsäquivalent von 0,5 Megatonnen TNT! Damit dürfte eine obere Grenze erreicht sein, da die A. im Prinzip durch die kritische Masse des reinen Spaltstoffes bei geeigneter Anordnung begrenzt ist.

Die *Neutronen-Lebensdauer in der A. ist wie beim schnellen Reaktor außerordentlich klein und hat die Größenordnung von 10^{-8} s. Da zur Spaltung von 1 kg Spaltstoff etwa 80 Generationen erforderlich sind, werden rund $2 \cdot 10^{13}$ cal innerhalb von ca. 10^{-6} s in Form von prompter Strahlung freigesetzt (die verzögerte Strahlung mit einem Energieanteil von etwa 11 % ist hier nicht mitgerechnet). Die momentan freigesetzte

Energie verteilt sich auf die kinetische Energie der Spaltfragmente (83 %), die prompte Gammastrahlung (3 %) und schnelle Neutronen (3 %).

Die totale Gammaaktivität der bei der Explosion einer Nominalbombe entstehenden Spaltprodukte in Mega Curie beträgt nach

1 min	$8{,}2 \cdot 10^5$	1 Monat . .	2,3
1 h	$6{,}0 \cdot 10^3$	1 a	0,11
1 d	133	10 a	$0{,}8 \cdot 10^{-2}$
1 Woche	13	100 a	$0{,}6 \cdot 10^{-3}$

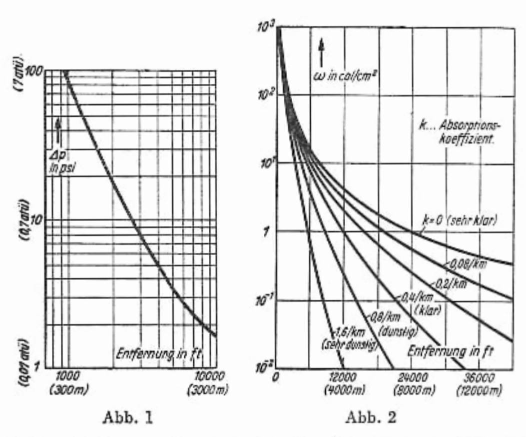


Abb. 1 Abb. 2

Die Wirkung des bei der Explosion entstehenden Stoßwellenüberdrucks Δp sowie die totale Wärme-Energiedichte w als Funktion der Entfernung vom Explosionsort geht aus den Abb. hervor. [13]

engl.: atomic bomb franz.: bombe atomique

Lit.: The Effect of Atomic Weapons, USA-Government Printing Office, Washington, 1950.

Atomenergie. Unter A. versteht man nicht die Energie, die beim Zusammentreten von Kern und Elektronen zu einem Atom frei wird, sondern die innere Energie des Kerns, oder die bei Kernumwandlungen frei werdende Energie. Man sagt dafür besser *Kernenergie. [1]

engl.: atomic energy franz.: énergie atomique

Atomenergiebehörde, internationale, s. internationale Atomenergie-Organisation.

Atomenergiegesellschaft, Europäische, offiziell *European Atomic Energy Society*: Im Juni 1954 gegründete Organisation, die in Form des lockeren Zusammenschlusses einer wissenschaftlichen Vereinigung sowohl der kernphysikalischen Forschung als auch der praktischen Nutzbarmachung der Atomenergie für friedliche Zwecke dienen will. Vorsitzender: z. Z. Sir John Cockcroft, Großbritannien. Derzeit elf Mitglieder: Bundesrepublik Deutschland, Belgien, Dänemark, Frankreich, Großbritannien, Holland, Italien, Norwegen, Portugal, Schweden, Schweiz, jeweils vertreten durch ihre obersten nationalen Atombehörden bzw. -organisationen. [24]

Atomenergiegesetze, s. Atomenergierecht.

Atomenergiekommission. Staatliche oder staatlichen Behörden unterstellte bzw. beigeordnete Gremien und Führungsstäbe aus Naturwissenschaftlern, Politikern, Verwaltungsfachleuten, Wirtschaftsvertretern, vielfach auch Militärspezialisten usw., deren Aufgabe es ist, die zivilen (und militärischen) Atomvorhaben ihres Landes in mehr oder weniger starkem Maße zu planen, zu kontrollieren, zu lenken und durchzuführen.
In Deutschland üben die bisher gegründeten Atomkommissionen nur beratende Funktionen auf nichtmilitärischem Gebiet aus. [24]
engl.: atomic energy commission
franz.: commissariat de l'énergie atomique

Atomenergieorganisation, internationale, s. Internationale Atomenergieorganisation.

Atomenergierecht, auch Kernenergierecht. Die Gesamtheit der rechtlichen Spezialnormen, die die gesellschaftlichen Auswirkungen der Freisetzung von *Atomenergie juristisch regeln (in einigen Ländern bereits durch besondere Atomenergiegesetze, in anderen vorerst nur durch organisatorische Maßnahmen und Verträge). Erfaßt zahlreiche Rechtsgebiete, wie Verwaltungs-, Gewerbe-, Berg-, Wasser-, Versicherungs- und Patentrecht, und berührt sich mit dem Energiewirtschaftsrecht.

Das Internationale Atomenergierecht umfaßt Völkerrecht (z. B. Atomwaffenverbote) einschließlich zweiseitiger (z. B. Uranlieferungsabkommen) und mehrseitiger zwischenstaatlicher Verträge (z. B. über die Europäische Organisation für Kernphysikalische Forschung – CERN –), ferner internationales Privatrecht (Rechtsbeziehungen von Privatpersonen und Unternehmen verschiedener Nationalität untereinander). [24]
franz.: droit nucléaire

Atomformfaktor (auch Atomfaktor), ein Faktor, welcher bei der Beugung von Röntgen-Strahlen an einem Kristallgitter die Tatsache berücksichtigt, daß die einzelnen Atome des Gitters nicht, wie man dies in erster Näherung annehmen kann, punktförmige, schwingende Dipole sind, sondern eine räumliche Ausdehnung haben, wodurch die einzelnen Teile des Atoms je für sich Streuwellen geben, die miteinander interferieren. [1]
franz.: facteur (atomiques) de forme

Atomgemeinschaft, Europäische, auch Europäischer Atompool, s. *Euratom. [24]

Atomgewicht. A.e sind relative Zahlen, die die Masse der Atome kennzeichnen. Für chemische Reaktionen ist es zweckmäßig, dem Sauerstoff die Zahl 16 willkürlich zuzuordnen. Denkt man sich von einem chemischen Element eine solche Menge in g, wie das A. angibt, so gehören zu dieser Menge stets die gleiche Zahl von Atomen. Dies ist die Loschmidt-Zahl. – Für Zwecke der Atom- und Kernphysik ist diese Definition nicht gemacht. Sie wäre aber fast anwendbar gewesen. Die festgesetzte Zahl 16 für das A. des Sauerstoffs entspricht der Zahl der Nukleonen im Kern des Hauptisotops (der Massenzahl). Im natürlich vorkommenden Sauerstoff, der der Chemie zugrunde liegt, gibt es aber neben dem $^{16}_{8}O$ noch geringe Beimengungen von $^{17}_{8}O$ und $^{18}_{8}O$, so daß die Massendefinition sich auf ein Isotopengemisch gründet. Daher hat man in der Kernphysik die (physikalische) Masseneinheit *ME eingeführt, die sich auf $^{16}_{8}O$ allein gründet. Dem A. 1 entsprechen 1,000272 ME. [1, 7]
engl.: atomic weight (chem. Skala)
franz.: poids atomique, masse atomique

Atomgewichtsbestimmung, chemische, zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Isotopen. Für eine Bestimmung der relativen Konzentration von Isotopen wird bei bekanntem Atomgewicht der Isotope gelegentlich eine chemische Bestimmung des Atomgewichts verwendet, z. B. beim Chlor. [14]
engl.: determination of atomic weight
franz.: détermination du poids atomique

Atomgitter ist ein Kristallgitter, in welchem einzelne, und zwar ungeladene Atome an den Stellen der Gitterpunkte sitzen, im Gegensatz etwa zum Molekülgitter oder zum *Ionengitter. A. liegen vor bei den Metallen sowie beim Diamant, bei den festen Edelgasen, und bei vielen Oxyden, Sulfiden und ähnlichen Verbindungen, wie etwa SiO_2, ZnS usw. Die Bindung im A. entspricht der homöopolaren Bindung im Molekül. Meist wird die metallische Bindung hiervon noch als Untergruppe abgetrennt. [1]
engl.: atomic lattice
franz.: réseau atomique

Atomindustrie. Sammelbegriff für die Gesamtheit der industriellen Unternehmen, die sich in irgendeiner Weise auf einem der Kernenergiegewinnung gewidmeten Gebiet (vom Uranbergbau bis zur Meßgeräteerzeugung) betätigen. [24]
engl.: atomic industry
franz.: industrie atomique

Atomkern, s. Kern.

Atomkraftwerk. Ein Kernreaktor, dessen Hauptzweck es ist, wirtschaftlich verwertbare Energie zu liefern (vor allem in der Endform von Elektrizität). Im weiteren Sinn: Die Gesamtheit der hierzu notwendigen Anlagen, bestehend aus dem Reaktor selbst, den Einrichtungen zur Übertragung der erzeugten Wärme und zur Umwandlung in die verwertbare Energieform einschließlich der nötigen *Strahlenschutzvorrichtungen.
Praktisch verwertbare Energie wurde erstmals auf der Welt im Dezember 1951 in kleinem Maß aus dem *EBR-Reaktor bei Arco, USA, gewonnen. Die erste als Atomkraftwerk zu bezeichnende kleine Anlage, aus der Strom längere Zeit hindurch gewonnen wurde (5000 kW), ist in der Sowjetunion am 27. Juni 1954

in Betrieb genommen worden. In den USA wurde am 17. Juli 1955 erstmals der gesamte Strombedarf des Ortes Arco (1200 Einwohner) durch den *BORAX-Reaktor gedeckt.

Atomkraftwerke mit Leistungen, die mit konventionellen Kraftwerken vergleichbar sind, gibt es bisher (Ende 1957) nur bedingt. In Betrieb sind: Ein Werk mit zunächst zwei Reaktoren zu je 42 000 ekW in *Calder Hall, England, seit Oktober 1956; ein Werk mit zunächst 60 000 ekW in *Shippingport, USA, seit Dezember 1957. [24]

engl.: atomic power plant
franz.: centrale nucléaire,
centrale électrique nucléaire

Atommasse. 1. Syn. mit Atomgewicht bzw. Isotopengewicht (relative A.), 2. die absolute Masse eines Atoms in Gramm. [1]
engl.: atomic mass
franz.: masse atomique

Atommedizin. Sammelbegriff für jene medizinischen Fachgebiete, die sich mit der Anwendung und Wirkung von energiereichen *Strahlen und Strahlenteilchen auf den lebenden Organismus befassen. [24]
franz.: médecine nucléaire

Atommodell, eine anschauliche, meist detailliert räumliche Vorstellung vom Aufbau eines Atoms. Das A. soll in möglichst einfacher Weise vom tatsächlichen Verhalten des Atoms Rechenschaft geben. Im Laufe der Entwicklung hat sich gezeigt, daß sich kein anschauliches Modell finden läßt, das dem Verhalten des Atoms in jeder Hinsicht gerecht wird, daß es also überhaupt kein „richtiges“ A. gibt. Trotzdem kann z. B. das Bohr-Sommerfeldsche A. sehr viele Eigenschaften des Atoms wenigstens qualitativ und eine ganze Anzahl auch quantitativ richtig wiedergeben, so daß es als angenähertes „Bild“ des Atoms wertvolle Dienste leistet.

Zu Anfang der wissenschaftlichen Atomvorstellungen faßte man die Atome einfach als kleine, massive, mehr oder weniger starre Kügelchen auf. Die bald empirisch

erwiesene Tatsache, daß Elektronen – und damit natürlich auch positive Ladungen – in den Atomen vorkommen, führte W. Thomson und J. J. Thomson zu der Annahme, daß im Innern einer positiv geladenen Kugel die Elektronen sich aufhalten (Thomsonschen A.).
Nachdem dann Lenard 1903 aus dem Durchgang von Elektronenstrahlen durch Materie geschlossen hatte, daß das Innere der Atome zum größten Teil leerer Raum sein müsse, tat Rutherford auf Grund seiner Messung der Streuung von α-Teilchen 1911 den entscheidenden Schritt zu unserer heutigen Auffassung, daß das Atom aus einem winzigen positiven Kern und einer Hülle negativer Elektronen besteht (Rutherfordsches A.).
Auf dieses A. wandte Niels Bohr 1913 die damalige Quantentheorie an mit den zwei Postulaten:
1. Von den mechanisch im Kraftfeld des Kerns möglichen Bahnen der Elektronen sind auf Grund von „Quanten"-Vorschriften nur ganz bestimmte zugelassen, welche zu den bestimmten Energieniveaus des Atoms führen.
2. Beim Übergang von einem Energieniveau nach einem andern strahlt das Atom die Energiedifferenz als Lichtquant $h\,\nu$ aus (bzw. absorbiert sie, wenn der Übergang vom tieferen zum höheren Niveau erfolgt). Der weitere Ausbau dieses Gedankens durch Sommerfeld ergibt das heute noch viel gebräuchliche Bohr-Sommerfeldsche A.
Die Aufstellung der Wellenmechanik durch Schrödinger und der Quantenmechanik durch Heisenberg 1926, insbes. die Heisenbergschen Unschärferelationen zeigten dann, daß das Bohr-Sommerfeldsche A. nicht streng haltbar ist, da man von Elektronenbahnen im strengen Sinn gar nicht mehr reden kann, daß es aber als anschauliches Näherungs-Bild durchaus wertvoll bleibt. [1]
engl.: atomic model
franz.: modèle d'atome

Atommoment, magnetisches. Die einzelnen Elektronen eines Atoms haben sowohl durch ihren *Spin als auch infolge ihres Umlaufs ein magnetisches Moment

(Spinmoment und Bahnmoment). Heben sich die magnetischen Momente der verschiedenen Elektronen gegenseitig **nicht** auf (paramagnetische Atome), so besitzt auch das Atom als Ganzes ein magnetisches Moment, welches in der Größenordnung einiger Bohrscher Magnetonen liegt. [1]
engl.: magnetic moment of atom
franz.: moment magnétique

Atomnummer, s. Ordnungszahl.
engl.: atomic number
franz.: nombre atomique

Atomradius. Ein fester Radius läßt sich für ein Atom nicht angeben, da sowohl nach dem Bohr-Sommerfeldschen Atommodell das äußerste Elektron keinen solchen definiert, als auch nach der Wellenmechanik, wo die Wahrscheinlichkeitswolke der Elektronen grundsätzlich bis ins Unendliche reicht, keine feste Abgrenzung des Atoms nach außen existiert. Im festen Zustand der Materie ordnen sich aber die Atome vielfach so zusammen, als ob sie starre Kugeln von einem bestimmten Radius wären. Aus den gegenseitigen Atomabständen lassen sich die Radien dieser gedachten Kugeln errechnen, die man dann A. nennt. Je nach der Verbindung, aus der sie errechnet werden, fallen sie etwas verschieden aus. So ergibt sich z. B. der A. des Zinnatoms aus homöopolaren, tetraedrischen Verbindungen zu 1,40, aus homöopolaren oktaedrischen Verbindungen zu 1,49 und aus dem Metall zu 1,58 Ångström-Einheiten. Die Unterschiede sind noch größer, wenn man die gaskinetisch bestimmten A. mit heranzieht. [1]
engl.: atomic radius
franz.: rayon atomique, r. de l'atome

Lit.: J. d'Ans u. E. Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Springer, Berlin, 1949, 2. Aufl.

Atomsprengstoffe sind alle Substanzen, in welchen eine Kernkettenreaktion explosionsartig vor sich gehen kann. A. haben nichts mit gewöhnlichen Sprengstoffen zu tun, da die Energie, welche sie entwickeln, aus den Kernen der Atome stammt und durchschnittlich je Gewichtseinheit des Sprengstoffs einige Millionen mal größer ist als die aus den äußersten Bezirken der

Elektronenhülle stammende Energie der gewöhnlichen Sprengstoffe. Die Bezeichnung ist daher nicht korrekt. Richtiger wäre Kernsprengstoff. Es werden verwendet: ^{235}U, ^{239}Pu, ^{233}U. – Außer Kernspaltungen hat man auch *Fusionsprozesse leichter Kerne für Atomexplosionen benutzt, die durch gewöhnliche A. gezündet werden (Wasserstoffbombe). [1]

franz.: explosifs atomiques

Lit.: H. W. Smyth, Atomenergie, Reinhardt, Basel, 1947. – W. L. Laurence, Wasserstoffbomben, Metzner, Frankfurt a. M., 1951. – U. Jetter u. W. Hanle, Atomwaffen, Physik-Verlag, Mosbach, 1952. – The Effects of Atomic Weapons, hrsg. von der US-AEC, Washington, 1950

Atomvolumen, Volumen, das ein Grammatom eines Elements im festen oder flüssigen Zustand einnimmt. Das A., für alle Elemente nach steigender Ordnungszahl aufgetragen, liefert die Atomvolumen-Kurve, welche durch ausgeprägte Zacken nach oben an den Stellen der Alkaliatome die Periodizität des Periodischen Systems der Elemente sehr deutlich hervortreten läßt. Der höchste Zacken liegt bei Cäsium bei rund 70 cm^3/Grammatom (Francium, dessen A. nicht bekannt ist, würde wahrscheinlich einen noch etwas höheren haben), während die zwischen den Zacken liegenden Täler durchweg unter 10, bei Kohlenstoff (als Diamant) sogar auf rund 3 cm^3/Grammatom heruntergehen. [1]

engl.: atomic volume *franz.: volume atomique*

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, Springer, Berlin, 1957, 4. Aufl.

Atomwirtschaftsrecht, s. Atomenergierecht.

Atomzertrümmerung, ein in der populären Literatur viel gebräuchlicher, aber nicht zutreffender Ausdruck für *Kernumwandlung. [1]

engl.: atom smashing

franz.: écletement du noyau

Ätzen. Chemische oder elektrochemische Behandlung eines polykristallinen Werkstoffes zum Zwecke der Sichtbarmachung des *Gefüges. Die einzelnen Kristallite werden dabei je nach ihrer Zusammensetzung und ihrer kristallographischen Orientierung verschiedenartig angegriffen und sind im Mikroskop auf Grund ihrer verschiedenen Lichtreflexion zu unterscheiden. [4]

engl.: etching

franz.: attaque chimique bzw. attaque acide

Aufbau, die durch Spaltung, Neutroneneinfang und radioaktiven Zerfall im Kernreaktor bedingte Netto-Erzeugung chemischer Elemente (s. Gleichgewichtskonzentration). [12]
engl.: build-up
franz.: transmutation, synthèse nucléaire

Aufbereitung. 1. A. d e r B r e n n s t o f f e r z e. Die Rohstoffe der Kerntechnik, vorzugsweise Uran und Thorium, kommen nicht in reinem Zustande in der Natur vor. Um sie in die geeignete Form für die Kernspaltung im Kernreaktor zu bringen, ist es erforderlich, die reinen Stoffe (Metalle, Metallegierungen oder geeignete chemische Verbindungen) aus den Erzen (z. B. Carnotit, Monazitsand u. a.) und ihren Gemengen mit anderen Stoffen zu gewinnen. Aufgabe der A. ist es, solche Gemenge mit möglichst geringen Verlusten voneinander zu trennen (Erzaufbereitung), wobei geeignete, hinreichend voneinander abweichende Eigenschaften der zu trennenden Komponenten zur Durchführung der Trennung ausgenutzt werden. Voraussetzung für die A. ist ein physikalischer Aufschluß, d. h. die Schaffung eines Gemenges, in welchem die einzelnen Komponenten als einzelne Stoffindividuen vorliegen, i. a. durch vorhergehende *Zerkleinerung und *Klassierung, d. h. Sortierung nach Korngrößen oder Korngrößengruppen, z. B. durch *Sieben oder *Sichten. Weitere Möglichkeiten der A. sind: Läuterung (bei klebenden, feuchten oder schlammigen Stoffen), magnetische oder elektrische Trennung, *Flotation, *Extraktion fest-flüssig. Vgl. auch Urangewinnung.
2. A. d e s r a d i o a k t i v e n B r e n n s t o f f s aus einem Reaktor, s. Kernbrennstoffaufbereitung. [2]
engl.: processing
franz.: préparation, raffinage du minérai
traitement chimique

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. Dort zahlreiche weitere Literaturhinweise. – E. Berl, Chemische Ingenieurtechnik, Berlin, 1935.

Aufbeulung von Brennstoffelementen. Die Reaktion von metallischem Uran mit Luft, Wasser oder Wasserstoff führt zu Reaktionsprodukten mit geringerer Dichte als das Metall. Bei schadhafter oder poröser

*Hülse kann das Kühlmittel zum Uran gelangen und dort reagieren. Die Stellen, an denen eine Reaktion stattgefunden hat, markieren sich durch deutliche Beulen in der Hülse. Diese Beulen behindern die Wärmeabfuhr und führen daher zu Überhitzungen des Brennstoffs. Sie blockieren ferner die Kühlkanäle und können das Material der Hülse durch Überbeanspruchung zum Platzen bringen. Zur Vermeidung dieser Schäden benutzt man nur einwandfrei dichte Mantelrohre, die man vor der Verwendung auf Dichtigkeit prüft (*Helium-Leckprüfung). Eine weitere wichtige Vorbeugungsmaßnahme ist die Vermeidung von oberflächlichen Fremdmetalleinschlüssen, die insbesondere bei Aluminium leicht zur Lochkorrosion und damit zur Perforierung der Hülse führen. [20]
engl.: swelling
franz.: gonflement, boursouflures

Auffänger, Ausdruck für das Materiestückchen oder die Folie, auf die man eine energiereiche Strahlung auftreffen läßt, um in ihr Kernumwandlungen, künstliche Erzeugung von Elementarteilchen oder ähnliche Vorgänge zu bewirken. [1]
engl.: target
franz.: cible

Aufkohlung, Einwanderung von Kohlenstoff ins Metall bei der Erwärmung eines Metallblocks, der von Kohlenstoff oder C-abgebenden Stoffen umgeben ist. Bei der Stahlvergütung benutzt man die A. zur Erzielung bestimmter Stahleigenschaften. Beim *Hochvakuumschmelzen von Uran in Graphittiegeln findet sie unfreiwillig statt und ist unerwünscht. Zwar ist der Absorptionsquerschnitt von Kohlenstoff gegenüber thermischen Neutronen sehr gering, doch werden durch zu hohen Kohlenstoffgehalt die metallurgischen Eigenschaften des Urans ungünstig beeinflußt. [20]
engl.: carburization
franz.: carburation

Auflösung ist der Grad der Trennfähigkeit bestimmter Instrumente. Beim Mikroskop und Elektronenmikroskop ist die A. der kleinste Abstand zweier Punkte, die gerade noch getrennt abgebildet werden. Beim Spektrometer und Massenspektrometer ist die A. die

kleinste Wellenlängendifferenz bzw. Massendifferenz, die noch festgestellt werden kann. Bei Zählgeräten, etwa G e i g e r - Zähler oder Szintillationszähler, ist die A. die Zeitspanne, die zwei Zählereignisse (Teilchendurchgänge) mindestens haben müssen, damit sie noch getrennt registriert werden. [1]
engl.: resolution
franz.: pouvoir séparateur, p. resolvant

Auflösung, anodische, ist ein elektrochemischer Vorgang; legt man an zwei in einen Elektrolyten eintauchende Metallelektroden eine äußere Elektromotorische Kraft (EMK) an, so fließt zwischen den beiden Elektroden ein Gleichstrom. Die Metallatome der Anode gehen an dieser als Ionen in Lösung und wandern zur Kathode, wo sie abgeschieden werden oder zur Wasserstoffentwicklung Anlaß geben. In der Kernbrennstoffaufbereitung bedient man sich dieser anodischen Auflösung zur Entfernung von Brennstoffumhüllungen aus Edelstahl oder Zirkon. [22]
engl.: anodic dissolution
franz.: dissolution anodique

Auflösung, chemische, von Brennstoffelementen. Die ch. A. wird zur Überführung metallischer Kernbrennstoffe in die lösliche Salzform als erster Schritt der Aufbereitungsprozesse durchgeführt. Die Auflösungsmethoden unterscheiden sich je nach der Art der Brennstoffelemente und ihres Einhüllungs- und Legierungsmaterials teilweise erheblich voneinander.
a) v o n A l u m i n i u m - B r e n n s t o f f e l e m e n t e i n h ü l l u n g e n. Die A. wird häufig in kaustischen Natriumnitratlösungen vorgenommen. Die sehr stürmische Reaktion, bei der neben Wasserstoff auch Ammoniak entsteht, kann durch die Anwesenheit von Natriumnitrat unter Kontrolle gehalten werden:

$$Al + 0{,}85\ NaOH + 1{,}05\ NaNO_3 \rightarrow NaAlO_2 + $$
$$+ 0{,}9\ NaNO_2 + 0{,}15\ NH_3 + 0{,}2\ H_2O\ .$$

Bei obigen Reaktionsbedingungen wird in der Praxis die Al-Auflösung vorgenommen. Die primäre Laugenkonzentration soll aus Sicherheitsgründen niemals 10 % übersteigen. Neben Aluminium löst sich auch das unter der Aluminiumhülle befindliche Uran auf, bei

Laugenkonzentrationen bis zu 30 % kann man dies jedoch praktisch vernachlässigen.
b) von Kobalt- und Zirkonlegierungen. Die A. gelingt unter Anwendung der Hydrochlorination in der Gasphase bei Temperaturen von 600 °C (*Zirzex-Prozeß).
c) Edelstahllegierter oder umhüllter Brennstoffelemente geschieht in 4 bis 6 molarer Schwefelsäure bei der Siedetemperatur der Lösung. Anwesenheit von Stahlwolle im Reaktionsbehälter beschleunigt die A. des Brennstoffelements einschließlich seiner Hülse. Fe^{++}, Ni^{++}, Cr^{++} und Mn^{++} liegen als Sulfate vor, Niob und Uran bleiben als unlöslicher Bodensatz zurück. Die A. des Bodensatzes aus Uran und Niob geschieht nach Ablassen der Schwefelsäure mittels 2 m Salpetersäure. – Eine befriedigende A. edelstahllegierter Brennstoffelemente kann man auch auf anodischem Wege erreichen, und zwar in 1 bis 3 molarer HCl bei Spannungen von 2,5 bis 3 Volt.
Die Auflösung von Edelstahl in konzentriertem Königswasser im sogenannten *Darex-Prozeß (amer. Prozeßbezeichnung) wird ebenfalls mit Erfolg durchgeführt.
d) von Thorium. Sie erfolgt in Salpetersäure und wird durch die Anwesenheit von F^--Ionen katalytisch beschleunigt. Thoriumnitrat selber wirkt reaktionshemmend (im Gegenteil zum Uranylnitrat bei der Auflösung von Uran in HNO_3).
e) von Uran. Sie erfolgt in den meisten Fällen mittels Salpetersäure. Die Reaktion wird durch das sich bildende Uranylnitrat autokatalytisch beschleunigt.

$$U + 4\,HNO_3 \rightarrow UO_2(NO_3)_2 + 2\,H_2O + 2\,NO \quad (1)$$

$$U + 5{,}5\,HNO_3 \rightarrow UO_2(NO_3)_2 + 2{,}25\,NO_2 + 1{,}25\,NO + 2{,}75\,H_2O \quad (2)$$

$$2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2 \quad (3)$$

$$NO_2 + H_2O \rightarrow 2\,HNO_3 + NO \quad (4)$$

Die praktische A. wird nach Gl. (2) vorgenommen und zwar in Reaktionsgefäßen mit Rückflußkühler. Man beginnt die Reaktion mit 15 m HNO_3, NO wird mittels O_2 zu NO_2 oxydiert. Die entstehende wäßrige Lösung nennt man *Primärlösung. S. a. Bromtrifluorid-Prozeß.

Auflösung, chemische

f) Von Uran-Aluminium-Legierungen und Aluminium umhüllten Brennstoffelementen. A. wird sowohl mittels Säuren als auch mittels Basen vorgenommen. Als auflösende Säure wird vor allen Dingen Salpetersäure benützt. Als Katalysator der Aluminiumauflösung hat sich Quecksilbernitrat bewährt (0,005 m-$Hg(NO_3)_2$-Zusätze). Da bei der *TBP-Extraktion die Anwesenheit von Aluminiumnitrat sehr erwünscht ist, pflegt man als Vorbereitung zu diesem Prozeß sowohl bei Al-umhüllten als auch bei Al-U-legierten Brennstoffelementen die A. mittels HNO_3 ($Hg(NO_3)_2$ katalysiert) kontinuierlich vorzunehmen, dadurch werden die Volumina der radioaktiven Abfall-Lösungen beträchtlich reduziert. Bei der Pu-U-Extraktion im *Purex-Prozeß ist hingegen die Anwesenheit von $AlNO_3$ nicht erforderlich. –
Bei der A. in Basen benutzt man konzentrierte 6 m. NaOH. Die kaustische Auflösungsmethode birgt gegenüber der sauren z. Z. erhebliche Nachteile. Es bestehen Schwierigkeiten bei der quantitativen Gewinnung des festen Uranoxyds aus der Lösung, bei der Wärmeabführung aus den hochradioaktiven festen Reaktionsprodukten und bei der Entwicklung von H_2 in Abwesenheit von $NaNO_3$. Bei angereichertem Brennstoff entstehen durch die festen Reaktionsprodukte ferner erhebliche Schwierigkeiten in bezug auf die Einhaltung von einwandfrei unterkritischen Prozeßanordnungen, die nicht die Gefahr in sich bergen, so viel spaltb. Materials an einem Ort zu vereinigen, daß eine Kettenreaktion möglich ist.
g) Von zirkonlegierten oder umhüllten Brennstoffelementen; sie erfolgt in 6 bis 10 molarer Flußsäure (HF):

$$U + 4\,HF = UF_4 + 2\,H_2$$

$$Zr + 4\,HF = ZrF_4 + 2\,H_2$$

Der sich bildende Wasserstoff wird mit Stickstoff bis unter die Explosionskonzentration verdünnt. Die A. wird bei der Siedetemperatur der Säure vorgenommen. Das UF_4 ist in Wasser nahezu unlöslich, in Flußsäure ist es hingegen relativ gut löslich, die Löslichkeit nimmt mit steigender Säurekonzentration zu. Eine Konzentration von 1,65 m Zr, 7,4 m F^- wird als eine besonders stabile Lösung angegeben (s. a. „Speiselösung").

Eine A. von Zirkon läßt sich auch auf rein anodischem Wege in 3 m HCl bei Spannungen von 2,5 bis 3 Volt erreichen. [22]

engl.: chemical dissolution

franz.: dissolution chimique

Lit.: R. E. Blanco, Dissolution and Feed Adjustment, ORNL 57-4-84. – C. M. Slansky, Present Dissolution Methods for Zirkonium and Stainless Steel, in: Symposium on the Reprocessing of Irradiated Fuels, Brüssel, 20. bis 25. Mai 1957. TID 7534.

Auflösungsbehälter. Die Konstruktion und die Materialfrage der A., in denen die Brennstoffelemente aufgelöst werden, stellen ein schwieriges Problem der Brennstoffaufbereitung dar. Die Behälter werden aus Edelstahl (hoher Chrom-Nickel-Gehalt), Monel-Metall, Titan, Tantal oder Glas hergestellt. Das Innere der Behälter muß leicht entseuchbar sein, in den meisten Fällen sieht man einen Doppelboden vor, damit man die Behälter mit Dampf beheizen und für den Fall einer zu stürmisch verlaufenden Reaktion mit Wasser kühlen kann. Zum Zwecke der Entseuchung müssen innerhalb der Behälter Wasch- und Rieseldüsen sowie Rührer vorgesehen werden. [22]

engl.: dissolver vessel

franz.: récipient de dissolution

Lit.: R. E. Blanco, Dissolution and feed Adjustment, ORNL 57-4-84. – J. A. Buckham u. C. E. Stevenson, Dissolution Equipment, sowie C. M. Slansky, Materials of Construction, in: Symposium on the Reprocessing of Irradiated Fuels, Brüssel. Mai 1957, TND 7534.

Auger-Effekt. Unter A.-E. versteht man den Vorgang, daß ein in einer inneren Schale ionisiertes Atom, das z. B. durch Absorption von Röntgenstrahlung ein Elektron der *K*-Schale verloren hat, nicht dadurch in den Grundzustand zurückkehrt, daß etwa ein *L*-Elektron auf den freien Platz der *K*-Schale springt und dabei ein Röntgenquant $h\nu$ ausgesandt wird, das hier ein Quant der $K\alpha$-Strahlung wäre, sondern daß der Übergang des *L*-Elektrons in die *K*-Schale strahlungslos verläuft und die frei werdende Energie dazu verwandt wird, irgendein anderes Elektron aus der Elektronenhülle des Atoms herauszuwerfen.

Der A. wird vielfach auch als „innere Absorption" bezeichnet, da er im Endergebnis so aufgefaßt werden kann, daß zunächst ein Röntgenquant entsteht, das

aber dann im selben Atom unter Loslösung eines Elektrons wieder absorbiert wird. [1]
engl.: Auger effect *franz.: effet Auger*

Auktionsschaltung, im *Sicherheitssystem angewandte Mischschaltung zwischen mehreren gleichen *Meßkanälen, bei der immer nur der jeweils höchste Meßwert an das nächste Schaltelement (Signalrelais, Programmsteuerung) weitergegeben wird. Dadurch wird die Gefährlichkeit sogenannter „unsicherer" Fehler, bei denen die erforderliche Sicherheitsoperation fehlerhafter Weise nicht ausgelöst wurde, verringert, falls es unwahrscheinlich ist, daß die anderen Kanäle zufällig zur gleichen Zeit den gleichen Fehler haben.
Durch die A. wird also die Sicherheit des Reaktors nur erhöht, solange die Kontrollen der Kanäle sooft erfolgen, daß eindeutig immer nur höchstens ein Kanal defekt sein kann, weil die anderen den gleichen Meßwert anzeigen (gleichzeitig auftretende gleichgroße Fehler sind außerordentlich unwahrscheinlich!). Dazu können Koinzidenzkontrollschaltungen dienen, die automatisch den einzelnen fehlerhaften Kanal anzeigen. Zur Vermeidung von unnötigen Auslösungen der zugehörigen Sicherheitsoperationen (durch sog. „sichere" Fehler) empfiehlt es sich dann angesichts des größeren apparativen Aufwandes, auch gleich automatische Abschaltungen des abweichenden Kanals hinzuzufügen, womit die A. in Schaltungen vom Typ der *Zwei-von-drei-Schaltung übergeht. [9]
engl.: auction system *franz.: schéma en auctien*
Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactor and Power Plants, McGraw Hill, New York, 1955. – E. Siddall, Rep. Nr. 399, AECL (Kanada).

Ausbeute, 100 eV-, s. G-Wert.

Ausbeute von **Kernreaktionen.** Bei der Beschießung einer Substanz mit α-Teilchen oder anderen energiereichen Korpuskeln verlieren die meisten „Geschosse" ihre Energie durch Ionisation der Atome, ohne auf einen Kern zu treffen. Nur in den seltenen Fällen, wo ein direkter Kerntreffer erzielt wird, kann eine Kernumwandlung ausgelöst werden. Den im allgemeinen sehr kleinen Bruchteil aller eingeschossenen Korpuskeln, der zu Kernumwandlungen führt, nennt man A.

Er ist natürlich stark von der Energie der Geschoßkorpuskeln abhängig, und zwar für elektrisch geladene Korpuskeln (α-Teilchen, Protonen usw.) in anderer Weise als für ungeladene (Neutronen).

So ist z. B. die Anzahl von eingeschossenen Protonen, die man zur Umwandlung eines Fluor-Kerns nach der Reaktion ^{19}F (p, α) ^{16}O braucht, bei 0,36 MeV Energie der Protonen 70 Millionen, bei 1,05 MeV dagegen nur noch 1,7 Millionen. Ähnlich wie hier nimmt die A. bei den meisten Kernreaktionen mit steigender Energie der Geschosse stark zu; nach Überschreitung einer gewissen Energie nimmt sie aber wieder langsam ab. Abgesehen von diesem gleichmäßigen Verlauf gibt es häufig ganz bestimmte Energien mit abnorm hoher Ausbeute (Resonanzenergien).

Für Neutronen als Geschosse, die ja nicht gegen die Abstoßung des Kerns anlaufen müssen wie die positiv geladenen Teilchen, ist die A. bei ganz niedriger Energie (Bruchteile eines eV) besonders hoch und nimmt mit zunehmender Energie dauernd ab, abgesehen von besonderen Resonanzenergien, die auch hier häufig mit extrem hoher Ausbeute auftreten. Die A. kann auch in einen Wirkungsquerschnitt für den betreffenden Prozeß umgerechnet werden, der dann ebenfalls zweckmäßig in Abhängigkeit von der Energie angegeben wird. [1]

engl.: yield of nuclear reactions

franz.: rendement des réactions nucléaires

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl. Oldenbourg, München, 1958.

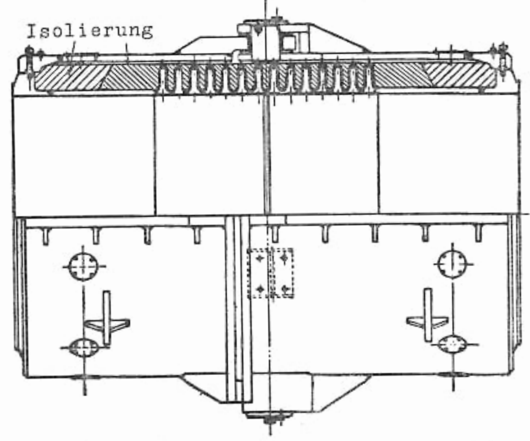
Ausbrand, von manchen Stellen gebrauchtes Wort für *burn-up,* deutsch *Abbrand. Um ein Durcheinander mit der wörtlichen Übersetzung von *burn-out,* das die Bedeutung von *Durchbrennen hat, zu vermeiden, sollte A. nicht gebraucht werden. [7]

Ausdehnungsgefäß. Ein A. ist bei geschlossenen Kreisläufen und Behältern notwendig, welche ganz mit einer inkompressiblen Flüssigkeit gefüllt sind. Bei Systemen unter Überdruck bestimmt der Gas- bzw. Dampfdruck über der Flüssigkeitsoberfläche im A. den Systemdruck. Bei Druckwasserreaktoren wird der Dampfdruck durch Beheizen des A.s erzeugt, daher ist hierfür die Bezeichnung *Druckerzeuger *(engl.: press-*

urizer) üblich. Beim amerikanischen *PWR z. B. hat das A. einen Inhalt von 8,5 m³ und der Reaktor selbst einen Inhalt von 40 bis 45 m³. [8]

engl.: expansion vessel *franz.: récipient d'expansion*

Ausdehnungsstück, s. a. Kompensator. Da sich Rohrleitungen, welche feststehende Behälter oder Maschinen miteinander verbinden, durch Erwärmung und Innendruck beträchtlich längen, müssen Möglichkeiten zu ihrer Ausdehnung geschaffen werden, um unzulässige Beanspruchungen zu verhindern. Je nach den gegebenen Verhältnissen können dazu Rohrschleifen, Faltenbälge oder Stopfbuchsen eingebaut werden. Wegen der hohen Ansprüche an Dichtheit und Korrosionsbeständigkeit sind oft dabei beträchtliche technische Schwierigkeiten zu überwinden. [8]



Ausdehnungsstück in der Kühlgasleitung (1,4 m ⌀) des Kernkraftwerks Calder Hall.

engl.: expansion joint, (bellow)
franz.: pièce de dilatation

Ausfluß, s. Neutronenausfluß.

Ausflußspektrum ist die Energieverteilung (das Spektrum) der aus der Spaltzone des Reaktors ausfließenden Neutronen. [7]

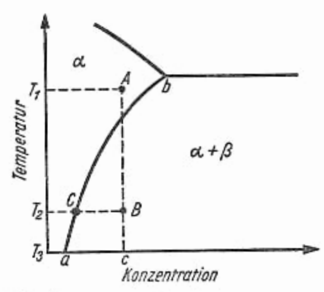
engl.: leakage spectrum
franz.: spectre des neutrons perdus

Ausfrierverfahren, s. Kristallisieren.
engl.: freeze-out *franz.: séparer par congélation*

Ausgleichsbereich bei der Reaktorsteuerung, Leistungsbereich, in dem die eingeprägten *Steuerreaktivitäten zumindest teilweise durch Temperatureffekte und Vergiftungen ausgeglichen werden. Der A. ist praktisch auf die letzten beiden Zehnerpotenzen der Leistung unterhalb der Vollast beschränkt. Man beachte, daß ein guter statischer Ausgleich nicht unbedingt auch eine gute dynamische Stabilisierung zur Folge hat. Im allgemeinen genügen die Ausgleichseffekte wegen ihrer geringen Größe und Schnelligkeit nur zur Stabilisierung sehr kleiner und sehr langsamer Reaktivitätsstörungen. Zur Erzielung einer guten Leistungskonstanz ist deshalb in den meisten Fällen trotz der Ausgleichseffekte noch ein besonderes *Leistungsregelsystem erforderlich. Das gilt besonders für den sicheren Übergang vom *Periodenbereich in den A. beim *Start. (S. a. Startverlauf.) [9]
engl.: power range
franz.: domaine de compensation

Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw Hill, New York, 1955. – I. U. Koppel, H. Schultz, Journ. Nucl. Energy 3, 312 (1956).

Aushärtung (Alterung). Die A. ist eine Reaktion in einem übersättigten *Mischkristallgefüge, welche durch Lagerung bei Raumtemperatur (Kaltaushärtung) oder bei erhöhter Temperatur (Warmaushärtung) zum Ablauf gebracht wird. Die Bedingung für



die Aushärtbarkeit einer Legierung ist eine temperaturabhängige Löslichkeit (im Zweistoffsystem z. B. die

Linie a–b). Die Legierung der Konzentration c besteht bei der Temperatur T_1 nur aus homogener Alpha-Phase (Punkt A). Durch Abschrecken auf die Temperatur T_3 (z. B. Raumtemperatur) kann es gelingen, die Ausscheidung von Beta zu unterdrücken. Man erhält somit einen metastabilen, übersättigten Alpha-Mischkristall. Durch Lagern bei dieser Temperatur treten innerhalb des Alpha-Mischkristalles Veränderungen der Atomanordnung auf, die im allgemeinen zu einer Steigerung der Härte und Festigkeit und zu einer Abnahme der Verformbarkeit führen (Kaltaushärtung). Durch Anlassen bei höherer Temperatur (z. B. bei T_2) hat der metastabile Alpha-Mischkristall vom Zustand B die Tendenz, unter Ausscheidung von Beta in den stabilen Zustand C überzugehen. Während dieses Ausscheidungsvorganges tritt gleichfalls eine Steigerung der Härte und Festigkeit und eine Abnahme der Verformbarkeit auf (Warmaushärtung). Die hohen Festigkeitswerte zahlreicher Aluminiumlegierungen und die magnetische Alterung stickstoffhaltiger Stähle beruhen z. B. auf derartigen Aushärtungsvorgängen. [4]

engl.: age hardening

franz.: durcissement structural

Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkde, Springer, Berlin, 1950. R. Glocker, Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, 3. Aufl., Springer, Berlin, 1949. – Z. Metallkde 43, 193–227 (1952). – Z. Metallkde 48, 223 (1957).

Auslaugen, s. Extraktion.

engl.: leaching

franz.: lessiver

Auslösebereich. Gebiet der Anodenspannung eines Zählrohres, in dem die Größe des abgegebenen Impulses einerseits von der Energie des auslösenden Teilchens unabhängig ist, und in dem sie sich andererseits mit der Höhe der Anodenspannung nur unbedeutend ändert. Praktisch mit dem *„Plateau“ der *Zählrohrcharakteristik, identisch. [6]

engl.: Geiger region, counter plateau

franz.: plateau, domaine de Geiger

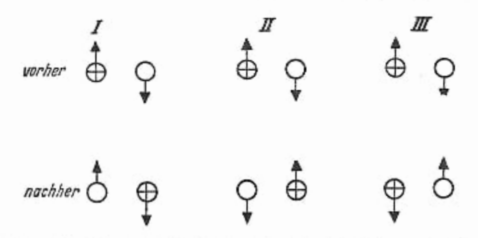
Auslösezähler, im Gegensatz zum Proportionalzähler ein Zähler für Korpuskeln, der unabhängig von der schwächeren oder stärkeren Ionisation auf alle Teil-

chen gleichermaßen anspricht, also z. B. α- und β-Teilchen nebeneinander zählt, ohne sie zu unterscheiden (s. a. Spitzenzähler und Zählrohr). [1]
engl.: release counter *franz.: compteur de Geiger*

Ausnutzungsfaktor eines *A*-Kraftwerks ist definiert durch den Quotienten aus der im Zeitraum T abgegebenen elektrischen Arbeit zu der in diesem Zeitraum maximal abgebbaren Arbeit (*Engpaßleistung $\times$ T). [21]

Ausscheidquerschnitt ist der Querschnitt einer halbempirischen Methode von Albert und Welton zur Bestimmung der Schwächung schneller Neutronen in einem Schild. Die A.e sind etwas kleiner als die totalen Wirkungsquerschnitte, sie werden experimentell ermittelt. [26]
engl.: removal cross section
franz.: section efficace résiduelle
Lit.: R. D. Albert u. T. A. Welton, USAEC Report WAPD-15, 1950.

Austausch. Der Gebrauch dieses Wortes in der Mikrophysik geht auf Heisenberg zurück (1926). Sie wurde entwickelt am Problem der Termsysteme von Para- und Orthohelium. In der Kernphysik geht er noch um einiges weiter.
1. Die Kräfte, die zwischen Proton und Neutron herrschen, erscheinen durch einen Platzwechsel der beiden verschiedenen Teilchen bedingt (Austausch-



Austauscherscheinungen am Proton-Neutron-System I nach Heisenberg, II nach Majorana, III nach Bartlett.

kräfte). Dabei kann der Spin entweder am Ort bleiben (Annahme von Heisenberg, I, s. Abb.) oder mitgenommen werden (Annahme von Majorana, II). Dieser Sachverhalt wird leichter ver-

ständlich, wenn man Proton und Neutron nicht als verschiedene Elementarteilchen, sondern als zwei verschiedene Quantenzustände e i n e s Elementarteilchens „Nukleon" auffaßt, dem neben den geläufigen räumlichen und Spinquantenzahlen eine Ladungsquantenzahl zugeordnet wird. Ausgetauscht werden dann auch hier nur Quanteneigenschaften. Der Fall III der Abb. enthält allein den Austausch der Spinquantenzahl (B a r t l e t t - Kraft).

2. Man denkt an den A. von Feldquanten, die emittiert und absorbiert werden. Das Feld zwischen Nukleonen hat als Quanten Mesonen verschiedener Art, das Feld zwischen elektrischen Ladungen hat als Quanten Photonen. Zwischen Nukleonen werden in einer Art Ballspiel Mesonen, zwischen elektrischen Ladungen Photonen ausgetauscht.

Die oben bezeichneten Ansätze für den A. von Proton und Neutron nach H e i s e n b e r g und M a j o r a n a lassen sich in dieser Sprechweise folgendermaßen darstellen: Ein Proton (Teilchen A) emittiert ein positiv geladenes π-Meson; dadurch wird es zu einem Neutron. Das Teilchen B, ein Neutron, absorbiert dieses positive Meson und geht dadurch in ein Proton über. Schematisch ist dieser Vorgang in vier Phasen folgendermaßen darstellbar:

Teilchen A	Teilchen B
P	N
$N + \pi^+$	N
N	$\pi^+ + N$
N	P

Ein ganz analoges Schema läßt sich aufstellen, wenn man dem Neutron (Teilchen B) die Emission eines negativen Mesons zuschreibt, das dann von dem Proton (Teilchen A) absorbiert wird. – Im Falle der H e i s e n b e r g schen Annahme ist das Meson spinlos anzusetzen. Im M a j o r a n a - Fall dagegen muß das Meson Spin tragen können. – Die Definition 2 ist in ihren Wirkungen mit der unter 1 gleichwertig; speziell ergeben sich auch in dieser Theorie die Austauschkräfte. [7]

engl.: exchange *franz.: échange*

Austausch, turbulenter, s. Nachtrag.

Austauschkraft ist diejenige Kraftwirkung, die mit dem *Austausch von Quanteneigenschaften zwischen Teilchen verbunden ist. [7]

engl.: exchange force *franz.: force d'échange*

Austauschoperator ist eine Rechenvorschrift, durch die irgendwelche Koordinaten von zwei Teilchen vertauscht werden. Er ist definiert durch die Gleichung: $P_{12}\, f(1,2) = f(2,1)$. Die analytische Darstellung erfolgt meist durch Matrizen. [7]

engl.: exchange operator

franz.: opérateur d'échange

Austauschreaktionen, chemische, zur Trennung von Isotopen. Sind an einer chemischen Reaktion die leichten und schweren Isotope eines Elementes beteiligt, z. B. $LX + SY \rightleftarrows LY + SX$, so ist die Gleichgewichtskonstante dieser Reaktion $K = [LY][SX]/[LX][SY]$ von 1 verschieden. Für eine Berechnung der Gleichgewichtskonstanten ist die Kenntnis der Verteilungsfunktionen f der beteiligten Moleküle, insbesondere ihrer Zustandssummen Q erforderlich. Da die Abweichung der Gleichgewichtskonstante von 1 – abgesehen von Verbindungen, die Wasserstoff bzw. Deuterium enthalten – gering ist, müssen für eine wirksame Anreicherung mit großem Gesamttrennfaktor zahlreiche Einzelprozesse hintereinandergeschaltet werden. Für diesen Zweck werden Austauschkolonnen verwendet, die in ähnlicher Weise wie Rektifikationskolonnen arbeiten, wenn der Austausch zwischen einer flüssigen und einer gasförmigen Phase stattfindet. Auch der Austausch zwischen zwei flüssigen oder zwei gasförmigen Phasen wird angewendet. [14]

engl.: exchange reactions

franz.: réactions d'échange

Austenit, Bezeichnung für *Gamma-Eisen.

engl.: austenite *franz.: austénite*

Austrittsdosis, s. Dosis.

engl.: exit dose *franz.: dose résiduelle directe*

Auswahlregeln, die durch die Quantentheorie festgelegten Einschränkungen der Übergangsmöglichkeiten eines atomaren Systems oder Atomkerns von einem Energieniveau zu einem anderen. So sind z. B.

in der Elektronenhülle eines Atoms nur solche Übergänge „erlaubt", bei denen sich die Bahndrehimpuls-Quantenzahl l eines „springenden" Elektrons um ± 1 ändert. Durch äußere Störungen, etwa elektrische Felder, werden die A. häufig durchbrochen. [1]

engl.: selection rules *franz.: règles d'exception*

Lit.: W. Finkelnburg, Einf. in die Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1956.

Autoklav. Größerer verschließbarer, für hohe Drucke ausgelegter Metallbehälter, in dem chemische Reaktionen unter großem Überdruck vor sich gehen können. Durch besondere Maßnahmen können sowohl Ausgangsstoffe zu- und Reaktionsprodukte abgeführt werden. Heizung und Rührung sind ebenfalls möglich. [18]

engl.: autoclave *franz.: autoclave*

Autoklavtest, s. Druckwassertest.

Autoradiogramm, s. Autoradiographie.

engl.: autoradiogram *franz.: autoradiogramme*

Autoradiographie, *Indikatorenmethode mit photographischer Detektion. Durch Einwirkung energiereicher Strahlung auf eine photographische Emulsion kann die Verteilung der aktiven Substanz in meist dünnen direkt mit dem Film in Kontakt stehenden Proben ermittelt werden. Die Schwärzung der Emulsion ist ein Maß für die Menge der radioaktiven Substanz. Diese Methode wird hauptsächlich zum Nachweis von radioaktiven Nukleiden in biologischen oder zoologischen Systemen angewendet. Das erhaltene photographische Bild nennt man A u t o r a d i o g r a m m. [3]

engl.: autoradiography

franz.: autoradiographie

Autosom, s. Chromosom.

engl.: autosome *franz.: autosome*

Autunit, s. Uranit.

AVC (automatic volume control), in englischen Veröffentlichungen gebräuchliche Abkürzung für eine Schaltung, die die mittlere Ausgangsspannung eines Verstärkers unabhängig von der Eingangsspannung auf einem bestimmten Wert hält. [6]

Avogadrosche Zahl ist die Zahl der Moleküle in 1 cm^3 irgend eines Gases unter Normalbedingungen.

Sie entsteht aus der Loschmidt-Zahl durch Division durch das Molvolumen von 22 421 cm^3.
Ihr Zahlenwert ist:

$$26{,}9 \cdot 10^{18}\ \text{Moleküle/cm}^3\,.$$

Selbst in einem Vakuum von 10^{-6} mm Hg sind demnach in jedem cm^3 noch 35 Milliarden Moleküle enthalten. Im Ausland sind die A. Z. und die Loschmidt-Zahl gerade vertauscht definiert. [1]
engl.: Loschmidt number
franz.: nombre de Loschmidt

azeotrop. Eine flüssige Mischung, die bei weiterer Destillation einen gleichbleibenden Siedepunkt aufweist, heißt a. Der Dampf hat also die gleiche Zusammensetzung wie die flüssige Phase. Ein a.s Gemisch kann durch Destillation nicht getrennt werden. [18]
engl.: azeotrope *franz.: azeotrope*

B

BIT. Im englischen Sprachgebiet gebräuchliches Energiemaß, das den Vergleich des Energiegehalts verschiedener Brennstoffe und die Zusammenfassung entsprechender Werte „bezogen auf 1 t" zuläßt (Basic one ton). [24]

Bahndrehimpuls. Der Drehimpuls, den ein Elektron in der Elektronenhülle des Atoms auf Grund seines Bahnumlaufs (im Sinne des Bohr-Sommerfeldschen Atommodells) besitzt, im Gegensatz zu dem Drehimpuls, der ihm auf Grund seines Spins zukommt (s. a. Spinmoment). Der B. des einzelnen Elektrons wird meist mit l bezeichnet. Mißt man ihn in Einheiten $\hbar = h/2\pi$ (h Plancksches Wirkungsquantum), so ist nach den Regeln der Quantenmechanik l eine ganze Zahl. Nach der Größe des B. erhält der betreffende Elektronen-Zustand seine Benennung als s-, p-, d-, f-Zustand, je nachdem $l = 0, 1, 2, 3$ ist (s. Atombau). [1]
engl.: orbital momentum
franz.: moment de rotation, impulsion orbitale

Bahnspur, die Spur, welche einzelne, rasch bewegte Korpuskeln in der Nebelkammer oder in der photo-

graphischen Schicht einer Photoplatte (s. Photoschicht-Spuren) hinterlassen. Die B. besteht aus einzelnen Punkten (in der Nebelkammer die an den einzelnen Ionen kondensierten Nebeltröpfchen, in der Photoschicht die einzelnen Silberkörnchen), die entweder so dicht liegen können, daß die B. als starker, zusammenhängender Strich erscheint, oder aber, deutlich getrennt, der B. ein perlschnurartiges Aussehen geben. Schon das Aussehen der B., besser noch das Auszählen ihrer Punkte unter dem Mikroskop, vermag daher häufig die Natur des Teilchens erkennen zu lassen, das die B. erzeugt hat. Gekrümmte B.en im Magnetfeld (s. Ablenkung, magnetische) erlauben darüber hinaus, die Energie des Teilchens zu ermitteln. [1]
engl.: orbit, trace   franz.: trace, trajectoire

Bandbreite eines Verstärkers ist die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten verstärkbaren Frequenz. Die obere Frequenzgrenze bestimmt bei Meßverstärkern die Zahl bzw. den Abstand der Ereignisse, die noch getrennt registriert werden können. In Zählrohrverstärkern wird daher vielfach Wert auf eine große Bandbreite gelegt. [6]
engl.: bandwidth   franz.: largeur de bande

Bandgenerator (auch van de Graaff-Generator) wurde von van de Graaff 1931 erfunden und ist eine elektrostatische Maschine zur Erzeugung von sehr hohen Gleichspannungen, die das Prinzip der Influenzmaschine in verbesserter Form anwendet. Der wesentliche Teil ist ein isolierendes, endloses Band, das über zwei, mehrere Meter voneinander entfernte, rasch rotierende Metallwalzen läuft, deren eine sich auf Erdpotential befindet, während die andere im Innern einer gut isolierten Metall-Hohlkugel gelagert ist, aus welcher das Band durch Schlitze austritt.
Durch eine geeignete Influenzierung (s. Influenz) elektrischer Ladung auf der Bandoberfläche wird erreicht, daß das Band dauernd elektrische Ladung in die isolierte Hohlkugel transportiert, so daß sich diese, wenn kein Strom entnommen wird, auf eine immer höhere Spannung auflädt, bis ein Funkenüberschlag erfolgt.
Der B. vermag schon in verhältnismäßig bescheidener Ausführung mehr als 1 Million Volt zu liefern. Im

Bereich von einigen MeV ist der B. eine wegen ihrer Konstanz geschätzte Spannungsquelle der Kernphysik. Vielfach werden auch B.n in Hochdruck-Kesseln untergebracht, wo sie wegen der verringerten Funken-Schlagweite weniger Platz benötigen.
Die Stromstärke des B. beträgt meist nur 10 bis 100 μA, konnte aber gelegentlich auch schon über 1 mA gebracht werden. Der B. dient ausschließlich wissenschaftlichen Zwecken, insbesondere Untersuchungen zur Kernumwandlung, wobei er gegenüber dem Zyklotron, dessen Maximalenergien er natürlich bei weitem nicht erreicht, infolge der Konstanz und leichten Regelbarkeit seiner Spannung gewisse Vorzüge hat. [1]
engl.: van de Graaff (-generator)
franz.: générateur électrostatique,
générateur van de Graaff

Lit.: A. Bouwers, Elektr. Höchstspannungen, Springer, Berlin, 1939. – W. Riezler, Kernphysik, Oldenbourg, München, 1957, 6. Aufl.

Barium 131, 133 und 139. Bei Bestrahlung des Erdalkalimetalls Barium mit Neutronen entstehen eine Reihe von radioaktiven Isotopen, von denen gewöhnlich die drei genannten in der Radiochemie und als *Leitisotope in Betracht gezogen werden. Es handelt sich um folgende Isotope:

rad. Isotop	Halbwertszeit	Strahlung
Ba^{131}	13 Tage	K, γ
Ba^{133}	7,5 Jahre	K, γ, e
Ba^{135} (angeregt)	29 Stunden	γ, e
Ba^{139}	85 Minuten	β, γ, e
Cs^{131}	9,6 Tage	K, γ (Tochter v. Ba^{131})

[16]

engl.: barium *franz.: barium*

Barium-Platinzyanür-Schirm. Durch Röntgenstrahlen, Kanalstrahlen oder durch die beim radioaktiven Zerfall ausgesandten Strahlen wird in

$$BaPt(CN)_4 \cdot 4\,H_2O$$

eine Fluoreszenz erregt, die zum Nachweis dieser

Strahlen dient. Diese Eigenschaft wurde 1896 von Henri Becquerel festgestellt. – Der B.-P.-S. wird auch als *Fluoreszenzschirm bezeichnet. [3]
engl.: fluorescence screen *franz.: écran fluorescent*

barn, eine für Wirkungsquerschnitte von Kernumwandlungen und Kernstreuungen eingeführte Flächeneinheit von 10^{-24} cm², während des Krieges in USA als Deckname eingeführt, *barn* = Scheune. [1]
engl.: barn *franz.: barn*

Bartlett-Kraft ist ein in der Kernphysik für die Anziehung von Nukleonen eingeführter Kraftansatz zwischen zwei Teilchen, bei dem die Spins der beiden Teilchen ausgetauscht werden. S. Austausch und Kernkraft. [7]
engl.: Bartlett force *franz.: force de Bartlett*

Baryt, Schwerspat, ist ein Mineral der Zusammensetzung $BaSO_4$, ein unlösliches Salz des schweren Elementes Barium. [26]
engl.: barytes
franz.: baryte

Baryt-Beton besteht aus Baryt und Portlandzement. Seine Dichte ist etwa 3,5 g/cm³, seine Zusammensetzung in Gew.-%: 42 % Ba; 31 % O; 10 % S; 9 % Fe; 4 % Ca; Rest H, Mg, Na, Si, Al, Mn. Siehe Schwerbeton. [26]
engl.: barytes concrete
franz.: béton (à la) baryte

Baryt-Limonit-Beton ist eine Mischung aus Baryt, Limonit und Portlandzement. Seine Dichte ist etwa 3,2 g/cm³, seine Zusammensetzung in Gew.-%: 38 % O; 32 % Ba; 14 % Fe; 8 % S; 5 % Ca; Rest H, Mg, Na, Si, Al, Mn. Siehe Schwerbeton. [26]
engl.: barytes-limonite concrete
franz.: béton baryte-limonite

Bedienungspult in der Schaltwarte eines Reaktors, pultartiger Arbeitsplatz des verantwortlichen Reaktorfahrers mit allen entscheidenden Steuerhebeln bzw. -tasten und den wichtigsten Stellungs- und Meßwertanzeigen. Das B. enthält im allgemeinen nicht die mehr sekundären Steuerorgane für bestimmte Kreislaufeinstellungen und dgl. und die Vielzahl der genauen

Anzeige- und Registriergeräte für Meßwerte und Signale. Weiteres s. *Schaltwarte. [9]
engl.: control desk, control console
franz.: panneau de commande

Bedingung, kritische, für einen Reaktor, s. kritische Gleichung.
engl.: critical condition *franz.: condition critique*

Beizen. Chemische oder elektrochemische Entfernung von Oxyden, Nitriden und dgl., die sich auf der Oberfläche eines Metalles befinden. Beizlösungen enthalten häufig Inhibitoren, welche den Angriff auf das Metall selbst verhindern oder hemmen. [4]
engl.: pickling *franz.: décapage*

Bel, dimensionslose Einheit zur Bezeichnung des Verhältnisses zweier (elektrischer) Leistungen, z. B. Ausgangsleistung/Eingangsleistung eines Verstärkers. Der Wert in bel ist identisch mit dem Zehnerlogarithmus des Verhältnisses. [6]
engl.: bel *franz.: bel*

Belebtschlammverfahren stellt ein Entseuchungsverfahren für schwachradioaktive Abwässer dar. Es beruht auf der Tatsache, daß Mikroorganismen, Einzeller, Algen usw. gewisse anorganische Salze aus wäßriger Lösung zu akkumulieren pflegen. Leitet man radioaktive Abwässer über vollbiologisch arbeitende Kläranlagen oder in Teiche mit reicher Fauna, so kann man eine beachtliche Abnahme der spezifischen Aktivität des Wassers feststellen, gleichzeitig steigt die Aktivität der Fauna an. Mit Hilfe dieses Verfahrens gelingt eine Entseuchung der Abwässer um einen Faktor 2 bis 10. Sie variiert je nach der Zusammensetzung des Abwassers. Bei dieser Entseuchungsmethode muß die radioaktive Fauna von Zeit zu Zeit entfernt und verbrannt werden, es ist streng darauf zu achten, daß weder Fische noch Vögel Zutritt zu diesen Anlagen haben. Die Verbrennungsgase werden nach Passieren von Waschtürmen und Absolutfiltern durch hohe Kamine in die Atmosphäre abgeblasen. [22]
engl.: biological waste treatment
franz.: méthode de purification des eaux usées par les microorganismes

Lit.: s. Abfall, radioaktiver.

BEPO. Abk. für British Experimental Pile Operation. Englischer Forschungsreaktor in *Harwell; nat. Uran, graphit-moderiert, luftgekühlt, 6000 kW Wärmeleistung. In Betrieb seit 5. Juli 1948. Konstruktion ähnlich dem *Oak Ridge Reaktor X-10. [24]

Bereich, kontrollierter, s. Nachtrag.

Berkeley. Stadt im Staat Kalifornien der USA an der Bucht von San Francisco. Sitz international hervorstechender kernphysikalischer Forschungsinstitute (Universität von Kalifornien, Strahlenlaboratorium der *AEC). [24]

Berkeley Nuclear Power Station, im Bau befindliches britisches Kernkraftwerk (300 MW el.) vom Calder-Hall-Typ. [13]

Berkeley Radiation Laboratory. Forschungslaboratorium (Grundlagenforschung) der amerikanischen Atomenergiekommission in *Berkeley. Betrieben von der Universität Kalifornien. [24]

Berkelium, das fünfte Transuran mit der Ordnungszahl 97; chemisches Symbol Bk. Das Isotop 243 wurde 1950 von Seaborg und Mitarbeitern in Berkeley in Kalifornien (daher der Name) durch Beschuß von Americium 241 mit energiereichen α-Teilchen erhalten. Es wandelt sich mit 4,6 Stunden Halbwertszeit durch K-Einfang um; daneben sendet es auch α-Strahlen aus. Inzwischen sind noch sieben weitere Isotope des B. aufgefunden worden mit Massenzahlen bis 250. Das langlebigste unter ihnen, das Bk 249, ist ein β-Strahler mit 290 Tagen Halbwertszeit. [1]

engl.: berkelium *franz.: berkélium*

Berliner Forschungsreaktor, s. FRB.

Berührungsschutz, Vorrichtung, die sich insbesondere bei stärkeren Beta- und Alphastrahlquellen als notwendig erweist, wenn die Gefahr besteht, daß das Präparat unmittelbar mit den Händen berührt wird. Der Berührungsschutz wird meist durch ein weitmaschiges Gitter in einem Abstand von einigen Zentimetern vor dem Präparat gebildet. Er soll eine Kontamination der Hände oder die Verabreichung einer reziprok zum Abstandsquadrat sehr rasch anwachsenden Strahlungsdosis verhindern. [16]

engl.: protective cover *franz.: grille de protection*

Beryll (s. Beryllium). Wichtigstes Beryllium-Mineral von der Zusammensetzung: $3\ BeO \cdot Al_2O_3 \cdot 6\ SiO_2$. Der Beryll bildet hexagonale Prismen und erscheint mit einem Gehalt von 0,3 % Chromoxyd als Smaragd. [3]

engl.: beryl *franz.: béryl*

Beryllium, Leichtmetall mit der Dichte 1,82, Ordnungszahl 4, Atomgewicht 9, Schmelzpunkt 1280 °C, Siedepunkt 2770 °C, Absorptionsquerschnitt $\sigma_{a,th} = 10$ mb, Kristallstruktur hexagonal dichteste Kugelpackung. Be ist ein geeigneter *Moderator und Reflektor für Reaktoren sowohl als reines Metall wie als Berylliumoxyd (BeO). Wegen der Reaktion $Be^9\ (\gamma, n)\ Be^8$ führt er zu einer leichten Neutronenvermehrung im Reaktor. Durch diese stark verzögert auftretenden Neutronen wird allerdings die Kontrolle eines Reaktors mit einem Berylliumreflektor oder -moderator erschwert. Das wesentliche Erz ist der Beryll-$Be_3Al_2(SiO_3)_6$. Be ist wegen seines hohen Schmelzpunktes und seiner guten Korrosionsbeständigkeit auch als Strukturmaterial gut geeignet. Gegen CO_2 ist das Metall bis 550–650 °C beständig, gegen flüssiges NaK bis etwa 600 °C. Der Beständigkeitsbereich gegenüber Wasser ist noch nicht genügend bekannt. Der Verwendung und Bearbeitung des Metalls steht seine enorme Sprödigkeit entgegen, die nicht mit der Reinheit zusammenhängt, sondern durch den Verformungsmechanismus bedingt ist. Ausreichend gute Bearbeitbarkeit beobachtet man bei pulvermetallurgisch hergestellten Blöcken. Durch bestimmte Verformung von Pulverkörpern kann man texturhaltiges Halbzeug herstellen (Bleche und Rohre), das in der Ebene Bruchdehnungen bis zu 40 % zeigt, senkrecht dazu aber erheblich spröder ist. Be-Metall ist toxisch und kann, als Staub eingeatmet, Lungenschäden und in Hautwunden gefährliche Entzündungen hervorrufen. Doch scheint sich die Toxizität nur bei Personen auszuwirken, die allergisch gegenüberB. sind. Be-Metall zeigt im Reaktor nur sehr geringe Strahlenschäden. Ein gerichtetes Wachstum ist nicht zu beobachten. [4, 7, 20]

engl.: beryllium
franz.: béryllium, glucinium

Berylliumoxyd. Sinterkörper aus BeO sind als Moderator und Reflektor verwendbar. Dem Metall mit der Dichte 1,84 sind sie wegen der höheren Dichte von 2,6 bis 2,9 sogar vorzuziehen. Ein Nachteil ist die bei allem keramischen Material auftretende Stoßempfindlichkeit. Strahlenschäden scheinen sich wesentlich stärker auszuwirken als bei dem praktisch strahlenfesten Metall. Bemerkenswert ist die hohe Wärmeleitfähigkeit von BeO ausreichender Dichte, die an die gutleitender Metalle heranreicht und wesentlich größer ist als die anderer gesinterter Oxyde. [20]

engl.: beryllia *franz.: glucine, oxyde de béryllium*

Beschickung, s. Reaktorcharge.

Beschickungsplan eines Reaktors, s. Reaktorbetrieb.

Beschickungssystem, Einrichtungen zum Laden eines Reaktors mit Kern-Brennstoff. Geschieht das Entladen verbrauchten Brennstoffs durch die gleichen Öffnungen, so wird diese Tätigkeit von der gleichen oder einer sehr ähnlichen Einrichtung ausgeführt. Da der Reaktor, nachdem er einmal in Betrieb war, sehr stark radioaktiv ist, muß der Vorgang des Ladens und Entladens ferngesteuert bzw. automatisch geschehen. Bei wirtschaftlichen Kernkraftwerken wird ferner gefordert, daß das Auswechseln von Brennstoffelementen während des Betriebes möglich ist. Deshalb sind die entsprechenden Einrichtungen oft sehr umfangreich und kompliziert. [8]

engl.: charging system *franz.: système de chargement*

Beschleuniger heißt jeder Apparat, der zum Beschleunigen geladener Teilchen auf hohe Energie dient. Meist wird der Ausdruck B. nicht für einfache Entladungsröhren benützt, sondern nur für Geräte mit Mehrfachbeschleunigung. Es gibt hier zwei große Gruppen: B. mit geschlossener oder spiralförmiger Bahn der Teilchen (Betatron, Zyklotron, Synchrotron, Synchro-Zyklotron, Protonensynchrotron = Synchro-Phasotron) und B. mit gestreckter Teilchenbahn (Kaskadengenerator, Bandgenerator, Impulstransformator, Linearbeschleuniger). [1]

engl.: accelerator *franz.: accélérateur*

Lit.: R. Kollath, Teilchenbeschleuniger, Vieweg, Braunschweig, 1955.

Beschleuniger, linearer, ist ein Beschleunigungsgerät für geladene Partikelchen, bei dem diese im Gegensatz zum Zyklotron, in welchem die Teilchen auf Kreisbahnen bzw. Spiralen umlaufen, sich geradlinig bewegen. Sie durchlaufen dabei in einer geraden Vakuumröhre durch eine entsprechende Hochfrequenzschaltung gesteuerte elektrische Felder, welche ihnen dauernd Energie zuführen. B. sind für Elektronen bis zu sehr hohen Energien gebaut worden. Der Stanford-Linearbeschleuniger z. B. liefert Elektronenstrahlen von 630 MeV und verspricht, eine Milliarde Volt zu erreichen. [1]

engl.: linear accelerator

franz.: accélérateur linéaire

Lit.: R. Kollath, Teilchenbeschleuniger, Vieweg, Braunschweig, 1955.

Beschußschaden, mitunter gebrauchter (eingeengter) Ausdruck für *Strahlenschäden, wenn diese durch materielle Teilchen ausgelöst sind. [7]

engl.: bombardment damage

franz.: altération par bombardement,
dommages dûs au bombardement corpusculaire

BE-Statistik, svw. Bose-Einstein-Statistik.

Bestleistung einer Maschine oder Anlage ist die Leistung, bei der diese ihren höchsten Wirkungsgrad hat. [21]

Bestrahlungsampulle, Ampulle aus einem Neutronen wenig absorbierendem Material (Quarz, Na-armes Glas) zur Bestrahlung von Flüssigkeiten mit Neutronen im Reaktor. Die Ampulle soll leicht mit Hilfe von Fernbedienungsgeräten, wie einem *Ampullenöffner, geöffnet und gehandhabt werden können (s. Bestrahlungsbehälter). [16]

engl.: irradiation ampoule

franz.: ampoule pour irradiations

Bestrahlungsbehälter sind Behälter, welche die zu bestrahlende Probe aufnehmen. B. sind für Gamma- und Neutronenbestrahlung erforderlich, wenn es sich um nicht formbeständige Proben handelt und durch die Bestrahlung der Probe Radioaktivität vermittelt wird. Für Neutronenbestrahlung im Kernreaktor sind diese Behälter genormt (Standard-Behälter). Sie

sollen aus einem Material bestehen, das nur in geringem Maße Neutronen absorbiert und dessen induzierte Radioaktivität nicht hoch ist oder sehr schnell abklingt. Hierfür erwies sich Aluminium und Quarz als geeignet. Glas ist wegen seines Natriumgehaltes nicht zu empfehlen. Die Behälter sollen außerdem leicht durch Fernbedienungsgeräte zu öffnen sein und im Reaktor in rationeller Weise deponiert werden können. Im allgemeinen werden an den Reaktoren nur Aluminiumbehälter benutzt. Quarzampullen mit flüssigem oder sonstigem Inhalt werden in einer Aluminiumkapsel mit Quarzwolle eingebettet. [16]
engl.: irradiation can
franz.: récipient pour irradiations

Bestrahlungsdosis, s. Dosis.

Bestrahlungseinheit ist die größtmögliche Materialmenge, welche in einem genormten *Bestrahlungsbehälter innerhalb eines Bestrahlungskanals des Kernreaktors bestrahlt werden kann. Bei Substanzen, die nur wenig Neutronen absorbieren, entspricht die B. dem Fassungsvermögen des Bestrahlungsbehälters. Gewöhnlich wird die B. so gewählt, daß der Aktivierungsverlust infolge Neutronenabsorption im Material bestimmte Grenzen nicht überschreitet. [16]
engl.: irradiation unit *franz.: unité d'irradiation*

Bestrahlungsschäden, Veränderungen in belebter und unbelebter Materie durch Einwirkung einer Strahlung. S. Strahlenschäden bei Schädigungen durch elektromagnetische Strahlung, s. Beschußschaden bei Schäden durch Teilchenstrahlen, insbes. Neutronenstrahlen. [4]
engl.: radiation damage
franz.: lésions par radiations (biol.),
altérations d'irradiation (phys.)

Bestrahlungs-Syndrom, s. Strahlenkrankheit.
engl.: radiation damagefranz.: syndrome d'irradiatio7

Bestrahlungsverfahren. Ziel der Bestrahlung des menschlichen Organismus mit ionisierenden Strahlen ist es, am Krankheitsherd eine möglichst große Dosis zu erreichen bei gleichzeitig möglichst weitgehender Schonung des gesunden Gewebes und vor allem der Haut. Die klassische Art der R ö n t g e n - Bestrahlung

Bestrahlungsverfahren

ist die sog. *Stehfeldbestrahlung* eines Krankheitsherdes mit einem oder mehreren Feldern verschiedener Größe. Der Tubus an der Austrittsöffnung der *Röntgen*-Röhre ist fixiert wie die *Röntgen*-Röhre selbst und liegt entweder der Haut mit Richtung auf den Krankheitsherd auf (z. B. bei Entzündungen oder bösartigen Geschwülsten) (Teilkörperbestrahlung) oder aber wird bei der Ganzkörperbestrahlung in bestimmter Entfernung des menschlichen Körpers fixiert, so daß die Bestrahlung in Form einer „Dusche“ geschieht.

Aus dieser konventionellen Therapiemöglichkeit sind weitere B. entwickelt worden. Ausgangspunkt aller weiteren B. ist der Wunsch, bei der Bestrahlung möglichst nur das kranke Gewebe zu treffen und das umgebende gesunde Gewebe weitgehend zu schonen.

Man unterscheidet zunächst einmal die sog. *Tiefentherapie*, deren Aufgabe darin besteht, genügende Strahlenmengen in die Tiefe zu bringen, ohne die Haut zu stark zu belasten. Dabei ist aber bei den üblichen Strahlenqualitäten die Strahlenmenge, die in die Tiefe gelangt, stets kleiner als die Strahlenmenge an der Oberfläche. Die zur wirksamen Bekämpfung z. B. einer Krebsgeschwulst notwendige Dosis ist aber meist höher, als die Haut ohne Schaden verträgt. Man benutzt deshalb im allgemeinen die sog. „Kreuzfeuermethode“, die mit jeder Apparatur für Tiefentherapie angewendet werden kann. Dabei werden mehrere Einfallsfelder benutzt, deren Strahlenkegel so gerichtet werden, daß sie sich im Krankheitsherd überkreuzen. – Der Fokus-Haut-Abstand beträgt bei der Tiefentherapie 30 bis 80 cm.

Das Bestreben der *Oberflächentherapie* geht nach weitgehender Schonung der tieferliegenden Körperschichten. Die Anforderungen an die *Röntgen*-Röhre sind deshalb längst nicht so groß wie bei der Tiefentherapie, da nur mit Spannungen zwischen 40 und höchstens 90 kV bestrahlt wird. Es gibt allerdings noch weichere *Röntgen*-Strahlen mit Spannungen von 6 bis 12 kV, die im wesentlichen zur Behandlung von Hautkrankheiten verwendet werden. Dazu sind allerdings Spezialröhren notwendig, denn normales

Röhrenglas ist für Strahlung, die längerwellig ist als 1 Å nicht mehr durchlässig. Man nennt diese Strahlen Grenzstrahlen. Im Rahmen der Oberflächentherapie sind noch weitere Spezialverfahren – und Röhren entwickelt worden, bei denen der Fokus möglichst nahe an den Krankheitsherd herangebracht werden soll und die Röhren einen möglichst kleinen Durchmesser haben sollen, damit sie an alle möglichen Stellen der Körperoberfläche herangeführt und evtl. in Körperhöhlen eingeführt werden können. Es gibt heute mehrere verschiedene Typen:

1. Das Körperhöhlenrohr nach Schäfer-Witte, das mit maximal 90 kV betrieben werden kann und vor allem gynäkologischen Zwecken dient.
2. Das Nahbestrahlungsrohr nach Chaoul, das mit maximal 60 kV arbeitet, aber außer für die Nahbestrahlung auch für Körperhöhlenbestrahlung gedacht ist.
3. Das Nahbestrahlungsrohr nach van der Plaats, betrieben mit 50 kV.
4. Ein universelles Körperhöhlen- und Nahbestrahlungsrohr für 50 ... 100 kV mit einem Außendurchmesser von nur 18 mm.

Alle diese Nahbestrahlungsgeräte haben einen Fokus-Haut-Abstand von 1,5 ... 5 cm.

Eine weitere Möglichkeit einer oberflächlicheren Bestrahlung mit dem konventionellen Tiefentherapiegerät ist durch die sog. „Kurzdistanzbestrahlung“ gegeben. Die Fokus-Haut-Abstände betragen hierbei 10 ... 25 cm.

Neuere Tiefentherapieverfahren sind die sog. „Siebbestrahlung“ und die verschiedenen „Bewegungsbestrahlungsgeräte“. Auch diese Geräte sind aus dem Gedanken heraus entwickelt worden, eine möglichst hohe Belastung des Krankheitsherdes bei weitgehender Schonung des gesunden Gewebes – insbesondere der Haut – zu erreichen. Bei der Siebbestrahlung wird zwischen Tubus einer normalen Stehfeldanlage und der Haut ein Bleisieb gelegt, so daß keine gleichmäßige Bestrahlung des Gewebes in Ausdehnung der Tubusgröße erfolgt, sondern eine siebförmige Aussparung stattfindet. Dadurch soll der

biologische Erholungsfaktor erhöht werden. Die Belastungsmöglichkeit der Haut ist dadurch fast um das Doppelte gesteigert. – Die Bewegungsbestrahlungsgeräte – K o n v e r g e n z -, R o t a t i o n s - und P e n d e l g e r ä t – suchen eine Lösung des Problems der Belastbarkeit der Haut und der notwendigen Dosis am Krankheitsherd einerseits durch eine Konvergenz – oder Pendelbewegung der Röhre um den Patienten zu lösen, andererseits aber durch eine Rotation des Patienten bei feststehender Röhre. Es gibt auch Kombinationsgeräte für Pendel und Konvergenz zugleich. [28]
engl.: irradiation procedure
franz.: procédé d'irradiation

Bestrahlungsverhältnis, s. Nachtrag.

Bestrahlungszeit, die Zeitdauer, während der sich ein Brennstoffelement im Reaktor befindet. Häufig tauscht man nach einer gewissen B. die Elemente im Reaktor untereinander aus, um trotz ungleichmäßigen Flusses einen gleichmäßigen Abbrand der Elemente zu erzielen. Die B. wird durch das *Zeitintegral des Flusses

$$\Theta = \int \Phi \, \mathrm{d}t = \overline{\Phi} \cdot t$$

gemessen. [12]
engl.: irradiation time *franz.: durée d'irradiation*

Betaquelle, s. Betastrahlquelle.

Betaradiographie, s. Nachtrag.

Betareflexion, s. Betarückstreuung.

Betareflexionskoeffizient, s. Betarückstreuung.

Beta-Reflexionssonde (Betareflexionsmeßkopf). Betastrahlungsquelle und Strahlungsdetektor sind zusammengebaut. Der Detektor empfängt nicht die direkte, sondern die von beliebigen Reflektoren rückgestreute Strahlung. Die günstigsten Verhältnisse herrschen, wenn sich entweder die Betastrahlquelle im Zentrum des ringförmigen Detektors befindet oder umgekehrt. B.-R.n werden hauptsächlich zur Schichtdicken-Messung nach dem B.-R.-Verfahren und zur Betareflexionsanalyse von Materialien verwendet. Der Detektor besteht üblicherweise aus einem *Fensterzählrohr. [16]
engl.: beta-reflection gage
franz.: jauge à réflexion bêta

Betarückstreuung. Wird ein Betastrahl gegen eine Oberfläche gerichtet, so kehrt ein großer Teil der Betateilchen seine Richtung um und fliegt teilweise nur mit wenig veränderter Geschwindigkeit zurück. Dieser Effekt wird als B., Betareflexion oder Betarückdiffusion bezeichnet. Eine endgültige theoretische Behandlung dieser Rückdiffusion liegt noch nicht vor. Bothe berechnete die Rückdiffusion unter einschränkenden Voraussetzungen.

Die gesamte von einem Reflektor rückgestreute Strahlung setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:

a) Eigentliche Rückstreuung des eingefallenen Partikels unter mehr oder weniger Energieeinbuße.
b) Sekundärelektronen, die von den Primärelektronen in der obersten Reflektorschicht ausgelöst wurden. Diese Elektronen besitzen eine Energie unter 100 eV.
c) Bremsstrahlung mit ihren Sekundärstrahlungen.
d) Vernichtungsstrahlen bei Positronen.

Für die eigentliche Rückstreuung ist ein Betareflexionskoeffizient p definiert:

$$p = \frac{\text{Zahl der rückgestreuten Elektronen}}{\text{Zahl der primär eingefallenen Elektronen}}.$$

Der Betareflexionskoeffizient ist ziemlich unabhängig von der Energie der Primärteilchen. Für Positronen liegt er um 23 % niedriger als für Betastrahlen. Für dicke Reflektoren bis herunter zur Rückdiffusionsdicke, die etwa die Größe der halben Reichweite hat, ist p unabhängig von der Dicke (unendlich dicker Reflektor). Bei dünneren Reflektoren nimmt p mit der Dicke bis zu Null ab (*unendlich dünner Reflektor). Bei Schichten wird jedoch die Unterlage mit abnehmender Schichtdicke reflexionsbestimmend (*Unterlagefehler, Rückstreufehler). Der Einfluß des Reflektormaterials ist sehr groß. p wächst von Werten nahe Null mit der Ordnungszahl der Atome des Reflektors bis nahe an 1.

Die B. wird in der Isotopentechnik hauptsächlich zur *Reflexionsdickenmessung von Materialien angewendet. [16]

engl.: beta-backscattering *franz.: réflection bêta*

Beta-Spektrum (β-Spektrum) ist ähnlich wie das α-Spektrum ein Energiespektrum und gibt die Verteilung der von einem radioaktiven Stoff ausgesandten Elektronen (β-Teilchen) auf die einzelnen Energien an. Zu seiner Aufnahme dient das β-Strahl-Spektrometer.

Beta-Spektrum

Es gibt ein kontinuierliches B.-S., in welchem alle Energien von ganz kleinen bis zu einer bestimmten Maximalenergie, die meist in der Größenordnung einer Million eV liegt, vorkommen und ein β-Linienspektrum, das nur einzelne ganz bestimmte Energien enthält.

Die Elektronen des β-Linienspektrums stammen gar nicht unmittelbar aus dem Kernzerfall, sondern werden durch primäre γ-Strahlen, die mit ganz bestimmten Quantenenergien aus dem Kern kommen, in der Elektronenhülle desselben oder eines anderen Atoms ausgelöst (innere Umwandlung).

Die Elektronen des kontinuierlichen B.-S. dagegen stammen direkt aus dem Kernzerfall. Der Kern enthält zwar keine Elektronen, aber diese bilden sich in den β-radioaktiven Kernen, indem ein Neutron des Kerns sich in ein Proton verwandelt, wobei ein Elektron neu entsteht.

Die Tatsache, daß das Spektrum kontinuierlich ist, stellt insofern zunächst eine Schwierigkeit dar, als man erwarten sollte, daß nur Elektronen einer bestimmten Energie entstehen, da ja der Kern von einer ganz definierten Anfangsenergie in eine ganz definierte Endenergie übergeht. Man muß daher annehmen, daß gleichzeitig mit dem Elektron jedesmal noch ein Neutrino ausgeschleudert wird und daß sich die bei der Kernumwandlung frei werdende Energie nach Zufall auf Elektron und Neutrino verteilt, so daß das Elektron beliebige Bruchteile dieser Energie bis maximal zur vollen Energie, welche der oberen Grenze des B.-S. entspricht, erhalten kann. Die Theorie dieses Vorgangs ist von Fermi gegeben worden und liefert eine befriedigende Deutung der Energieverteilung im B.-S. [1]

engl.: beta spectrum

franz.: spectre bêta

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Beta-Strahlen (β-Strahlen), eine der drei Strahlenarten der natürlichen radioaktiven Stoffe. Die B.-S. bestehen aus Elektronen, die meist mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausgesandt werden. Die elektrische und magnetische Ablenkung dient zur Bestimmung der Geschwindigkeit bzw. Energie der B.-S. Da die spezifische Ladung e/m bekannt ist, genügt e i n e Art der Ablenkung.

In den B.-S. kommen meist Elektronen aller möglichen Energien vor bis zu einer bestimmten Maximalenergie (s. β-Spektrum). Diese liegt meist in der Größenordnung von 10^6 eV. Am größten ist sie unter den B.-S. natürlich radioaktiver Stoffe beim Radium C mit 3,15 MeV. Natürlich radioaktive Kerne, welche B.-S. aussenden, sind außerdem z. B. Mesothorium 1 und 2, Thorium B, Thorium C, Uran X 1, Uran X 2, Radium D und Radium E. Auch künstlich radioaktive Stoffe senden vielfach B.-S. aus, häufig jedoch auch Positronen, welche man vielfach als β^+-Strahlen bezeichnet, da sie abgesehen von der positiven statt negativen Ladung sich in jeder Hinsicht genau so verhalten wie gewöhnliche B.-S. Hier kommen z. T. noch höhere Energien vor, z. B. beim radioaktiven Bor $^{12}_{5}B$ bis 12 MeV. [1]

engl.: beta rays

franz.: rayons bêta

Beta-Strahler sind radioaktive Stoffe, die Elektronenstrahlen (im erweiterten Sinn auch Positronenstrahlen) aussenden. Ein gewöhnlicher B. verwandelt in seinem Kern ein Neutron in ein Proton, ein Positronenstrahler ein Proton in ein Neutron. B. (beider Art) bilden den weitaus größten Teil der künstlichen radioaktiven Kerne. Unter den natürlichen Radioelementen (hier kommen nur gewöhnliche B. vor) sind Beispiele: Uran X 1, Radium B, Mesothorium 1 und 2, sowie (sehr schwach) die Isotope Kalium 40 und Rubidium 87.

Die meisten radioaktiven Isotope sind B., wovon in der Isotopentechnik etwa 100 gebräuchlich sind. Reine B. sind verhältnismäßig selten (z. B. P-32, Sr-89, Pa-109, Si-131, Tl-204, Sr-90, Sn-121, Pm-147, C-14, Ca-45, S-35). Die meisten B. emittieren außerdem noch Gammastrahlung, wenige Positronenstrahlung oder K-Strahlung.

Tabelle verschiedener in der Isotopentechnik gebräuchlicher **Betastrahler**
(angeordnet nach Teilchenenergie und Halbwertszeit)

Teilchenenergie in MeV	Halbwertszeit in Stunden, Tagen oder Jahren						
	< 1 h	1–6 h	6–24 h	1–5 d	5–30 d	30 d – 1 a	> 1 a
0 – 0,3		°Sr 87		Au 199	Os 191	*S 35 *Ca 45 (1) Fe 59 Nb 95 °Tc 97 Ce 144 (2) Ir 192 Hg 203	*H 3 *C 14 Ni 63 Ru 103 Sb 125 °Ba 133 (2) Cs 134 *Pm 147 Eu 155
0,3 – 0,5				Br 82 *Sn 121 Yb 175	Xe 133 Er 169	Sc 46 *Co 58 (2) Fe 59 Zr 95 Ce 141 Hf 181 W 185	Co 60
0,5 – 0,7		(3) Mn 56 (2) Ni 65	(1) Cu 64 (2) *Cu 64 Te 127 Gd 159 Pt 197	Rh 105 W 187	J 131 Tb 161 Lu 177	(1) Sb 124 Ta 182 (1) Ir 192	Kr 85 *Sr 90 (1) Cs 134 Cs 137
0,7 – 1,0	Zn 69	Kr 85	(1) Ga 72 (1) Gd 159	As 77 Au 198	Ag 111 Pr 143	Tm 170	Cl 36 *Tl 204
1,0 – 1,5	(1) Cl 38	*Si 31 A 41 (2) Mn 56 Nb 97 (3) Ni 65 Ru 105	Na 24 *Pa 109 Er 171	Mo 99 (1) Sb 122 Ce 143 Pm 149 Re 186 Os 193 Bi 210		*Sr 89 Y 91	
1,5 – 3,0	Al 28 Ga 70 Br 80	(1) Mn 56 (1) Ni 65 Ba 139 Nd 149	(2) K 42 (2) Ga 72 Zr 97 Pr 142 Re 188 Ir 194	As 76 Y 90 (2) Sb 122 Ho 166	*P 32 Rb 86	In 114 (2) Sb 124	
> 3	(2) Cl 38		(1) K 42 (3) Ga 72			Ce 144 – Pr 144	Ru 106 – Rh 106

* reiner β-Strahler
° Konversionselektronenstrahler

(1) wichtige β-Gruppe bei komplexem β-Zerfall
(2) zweitwichtigste Gruppe

Beta-Strahler Von den eigentlichen Betastrahlern, deren emittiertes Elektron aus dem Kern stammt, unterscheiden sich die Konversionselektronenstrahler, die durch γ-Strahlung des Kerns ein Elektron aus der Hülle herausschlagen. Deren Folgeprodukte haben demzufolge die unveränderte Ordnungszahl Z der Muttersubstanz, während ein B. auf die Ordnungszahl $(Z + 1)$ führt.

Bei den eigentlichen Betastrahlern handelt es sich um ein kontinuierliches Spektrum, das durch Angabe der Maximalenergie im Prinzip hinreichend beschrieben ist. Das Spektrum der Konversionselektronenstrahler ist dagegen ein Linienspektrum.

Bezüglich ihrer Meßbarkeit stehen die Betastrahler zwischen Alphastrahler und Gammastrahler. Alphastrahler bewirken zwar eine sehr hohe differentielle Ionisation, dafür ist die Reichweite der Strahlung so gering, daß sie vielfach bereits im Präparat oder in der Luftschicht quantitativ absorbiert wird, außerdem die Wandung der Meß-Sonde nicht zu durchdringen vermag. Die Reichweite der Gammastrahlung ist jedoch sehr groß, die Ionisation demzufolge so gering, daß z. B. Zählrohre nur eine geringe Ansprechempfindlichkeit für Gammastrahlung besitzen. Die Reichweite der Betastrahlen genügt zur Durchdringung der bei der Messung kaum vermeidbaren Absorptionsschichten. Ihre differentielle Ionisation reicht jedoch ebenfalls noch aus, um einen guten Meßwirkungsgrad zu erzielen.

Da beim Zusammentreffen von Positronen und Elektronen *Vernichtungsstrahlung (ein γ-Quant) entsteht, senden Positronenstrahler stets auch diese γ-Strahlung aus, deren Energie durch die Ruhmassen von Elektron und Positron (1,02 MeV) bestimmt ist.

Anwendung von Betastrahlern:

Wegen der günstigen Meßbarkeit und guten Abschirmbarkeit der Strahlung wählt man in der Isotopentechnik gerne Betastrahler aus, wenn die übrigen Umstände es erlauben. So sind die Betastrahler des Cl, K, Sb, Br, Na, Ag, Zn, Cs, Co, S usw. beliebte Arbeitssubstanzen der Radiochemie und Markierungssubstanzen in der Technik. Eine Sonderstellung nehmen die Isotope C-14 und T (H-3) ein, auf die man trotz ihrer

sehr weichen, schwer meßbaren Strahlung wegen Fehlens anderer radioaktiver Isotope dieser in den gesamten Naturwissenschaften sehr wichtigen Elemente (Wasserstoff in Kohlewasserstoffverbindungen und im Wasser, Kohlenstoff in der organischen Chemie) nicht verzichten kann. Eigene Meßapparaturen wurden für diese Isotope entwickelt.

Als reine Strahlquellen werden Betastrahler in Schicht- und Foliendickenmeßanlagen nach verschiedenen Absorptions- und Reflexionsverfahren, bei der Grobstrukturuntersuchung nicht zu dicker Materialien, zur Ionisierung der Luft und anderer Gase, zur Beeinflussung gewisser Eigenschaften von Kunststoffen, Valenz- und Ionenkristallen, als Bremsstrahlenquelle und zur therapeutischen Bestrahlung von Organoberflächen und der Haut benutzt.

Strahlengefährdung durch Betastrahler:

Obwohl Betastrahler leicht abschirmbar sind (z. B. durchdringt die Strahlung in vielen Fällen nicht einmal die Wandung des Reagensglases), ist dennoch sehr große Vorsicht bei ihrer Handhabung nötig. Gerade weil die Strahlung nur eine geringe Eindringtiefe in das Gewebe, bei gleicher Energie wie Gammastrahlung, besitzt, erzeugt sie dort eine hohe spezifische Ionisation. Die Gefährdung wächst sehr rasch, wenn man ohne, wenn auch nur relativ dünne, Abschirmmaterialien arbeitet. Die Strahlengefährdung ist am größten bei Kontamination der Haut und Inkorporation von Betastrahlern, wie z. B. des Strontiums, das sich in der Knochensubstanz anreichert und von dort aus das blutbildende Knochenmark bestrahlt. Im allgemeinen werden deshalb offene Betastrahler für gefährlicher als Gammastrahler angesehen. [1, 16]

engl.: β-emitter

franz.: radiateur bêta, sources bêta

Lit.: Radioactive Materials and Stable Isotopes, Catalogue No. 4, Isotope Division, Harwell, Engl., 1957.

Betastrahlquelle. Eine B. besteht mindestens aus einem radioaktiven Präparat und einem Präparatträger. Im allgemeinen wird jedoch eine gewisse technische Perfektion angestrebt, so daß ein optimaler und

strahlensicherer Einsatz erleichtert ist. Folgende Gesichtspunkte gelten für die Ausbildung von B.n: 1. Vermeidung von Selbstabsorption, 2. konstante spezifische Flächenaktivität, 3. gleichmäßige Erfüllung eines gewünschten Raumwinkels mit Strahlung oder Fokussierung der Strahlung, 4. gute Haftung des Präparates auf seinem Träger, 5. Ausbildung der Strahlquelle zum *„geschlossenen radioaktiven Präparat", 6. möglichst dünnwandige, jedoch sichere Bedeckung des Präparates, 7. strahlensichere Möglichkeit der Handhabung, 8. Sicherung gegen Mißbrauch.

B.n haben meist die Form von Metallplatten oder -Folien, auf die die strahlende Substanz, z. B. elektrolytisch, elektrophoretisch, durch Chemisorption oder durch Vakuumkondensation aufgebracht wurde. In der Regel wird dann die strahlende Substanz dauerhaft mit einer Folie oder Schicht abgedeckt. Hierfür nimmt man für weiche Strahler Aluminium, für harte Silber. Die so präparierte Folie oder Platte wird schließlich in eine Halte-, Transport- oder Bestrahlungsvorrichtung mehr oder minder auswechselbar einmontiert. Vielfach bringt man vor der Quelle noch einen *Berührungsschutz an. Spezielle B.n sind: *Tritiumquelle 0,018 MeV, Cer 144-Quelle 0,31 MeV, Prometium 147-Quelle 0,223 MeV, Ruthenium 106-Quelle 3,5 MeV, Strontium 90-Quelle 2,24 MeV, Thallium 204-Quelle 0,77 MeV.

Nach Anwendungsgebieten unterscheidet man: Betadurchstrahlungsquellen, Betareflexionsquellen, Entladungsschienen für statische Elektrizität, Betaquellen für Foliendickenmessung, Betaradiographiequellen, medizinische B.n.

Vielfach werden auch typisch offene B.n benötigt: z. B. flüssige oder gasförmige Strahlquellen, Verteilung des Strahlers als Kolloid in einer Flüssigkeit usw. Bei derartigen B.n ist den nötigen Sicherheitsvorkehrungen wesentlich erhöhte Beachtung zu widmen. [16]

engl.: beta-ray source *franz.: source bêta*

Betastrahl-Spektrometer (β-Strahl-Spektrometer), Apparat zur Aufnahme eines β-Spektrums. Er beruht auf der verschieden starken Ablenkbarkeit von β-Strahlen verschiedener Energie durch ein Magnetfeld

(s. Ablenkung, magnetische). Die β-Strahlen treten z. B. bei einem Typ im Hochvakuum durch einen feinen Spalt in einen Raum ein, in welchem ein homogenes Magnetfeld herrscht, das sie auf kreisförmige Bahnen zwingt, deren Krümmungsradius um so größer ist, desto größer die Teilchengeschwindigkeit ist. Nach Durchlaufen eines Halbkreises treffen Strahlen gleicher Geschwindigkeit, die aber den Spalt in etwas verschiedener Richtung passiert haben, wieder in einem Punkt zusammen (*Richtungsfokussierung). Dort steht die photographische Platte, auf der das β-Spektrum aufgenommen wird (s. a. Szintillations-Spektrometer). [1]

engl.: beta-ray spectrometer
franz.: spectromètre bêta

Beta-Teilchen ist ein Synonym für die die radioaktiven β-Strahlen bildenden Elektronen, in erweitertem Sinn auch für die die radioaktiven Positronenstrahlen bildenden Positronen. [1]

engl.: β-particle *franz.: spectromètre bêta*

Betatron, s. Elektronenschleuder.

Beta-Uran, s. Uran.

Beta-Zähler (β-Zähler), Strahlungsmeßgerät zum Nachweis von β-Strahlung. Am meisten verwendet werden Zählrohre, die entweder ein dünnes Fenster haben oder deren Wand aus dünnem Glas besteht.

Bei fensterlosen Zählern wird das aktive Präparat direkt in das Zählvolumen eingebracht. Dadurch können energiearme β-Teilchen, die in einem Fenster absorbiert würden, noch gemessen werden. Fensterlose Zähler arbeiten meistens im *Proportionalbereich und ermöglichen deshalb eine Trennung von α- und β-Strahlung. [17]

engl.: β-counter *franz.: compteur à rayons β*

Beta-Zerfall (β-Zerfall). Unter B.-Z. versteht man einen radioaktiven Zerfall eines Atomkerns unter Aussendung von β-Strahlen. Der durch den Zerfall entstehende Kern hat gleiche Massenzahl und um eine Einheit höhere Ordnungszahl wie der Ausgangskern. [1]

engl.: beta disintegration, beta decay
franz.: désintégration bêta

Bethesche Methode, ein Verfahren zur näherungsweisen Lösung der *Boltzmann-Gleichung. [13]
engl.: Bethe's method
franz.: méthode de Bethe
Lit.: B. Davison, Neutron Transport Theory, Clarendon Press, Oxford, 1957.

Beton ist ein Gemisch aus Zement, Sand und Kies. Gewöhnlicher B. variiert stark in seiner Zusammensetzung, je nach Art der Mischung. Ein normaler B. mit der Mischanweisung 1 Teil Portland-Zement, 2 Teile Sand, 4 Teile Kies und 15 % Wasser besteht aus 8,2 Gew.-% Zement, 28,7 % Sand, 56,4 % Kies und 6,7 % Wasser. Dieser B. hat eine Dichte von 2,3 g/cm^3 und kostet etwa 80 DM/cbm. Sein Absorptionskoeffizient für 3 MeV γ-Strahlen ist 0,08 cm^{-1} und seine Relaxionslänge für Neutronen 11,1 cm. B. findet, besonders mit Zusätzen, Anwendung als billigster Strahlenschutz für γ- und n-Strahlen. S. Schwerbeton. [26]
engl.: concrete
franz.: béton

Betriebstemperatur. Sowohl der thermische Wirkungsgrad als auch die Materialprobleme (z. B. Korrosion) eines Kernkraftwerkes werden in erster Linie durch das Temperaturniveau bestimmt. Maßgebliche Temperaturen sind die Austrittstemperatur des Reaktorkühlmittels und die Oberflächentemperatur der Brennstoffelemente.
Die Temperatur des Moderators bestimmt weitgehend die Energie der thermischen Neutronen. Wegen der diesbezüglichen Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte der Reaktormaterialien ergibt sich eine Rückwirkung auf die Reaktivität des Reaktors. [8]
engl.: operating temperature
franz.: température d'opération

Bettis-Plant. Reaktorentwicklungsanlage der amerikanischen Atomenergiekommission in Pittsburgh, USA. Betrieben von Westinghouse Electric Corp. [24]

BeV. Abk. für Billionen Elektronenvolt. Gemeint ist mit BeV die amerikanische „billion" gleich unserer Milliarde. Es ist also

$$1\ \text{BeV} = 1000\ \text{MeV} = 10^9\ \text{eV}\,.$$

Im deutschen Schrifttum wird statt BeV häufig GeV (Gigaelektronenvolt) geschrieben. [1]

Bevatron, eines der größten z. Z. in Betrieb befindlichen Protonen-*Synchrotrons. Das B. steht an der Universität in Berkeley, Kalifornien, hat nahezu 40 m Durchmesser, ein Magnetgewicht von 13 000 t und liefert Protonenstrahlen von etwas mehr als 6000 MeV. [1]

engl.: bevatron *franz.: bevatron*

Bewegungsunschärfe. Jede Bewegung eines Objektes oder Objektteils während der Röntgen-Aufnahme verwischt die Randkonturen und bringt dadurch eine zusätzliche Unschärfe in das Röntgen-Bild. Es muß deshalb bei Röntgen-Aufnahmen möglichst jede Bewegung ausgeschaltet werden. Lediglich in Ausnahmefällen wie bei der Röntgen-Aufnahme einer Halswirbelsäule z. B. ist eine Bewegung einzelner Körperteile angebracht, um durch den Verwischungseffekt eine Überschneidung von Konturen auf der Aufnahme zu verhindern. So läßt man bei Halswirbelsäulen-Aufnahmen den Patienten gern mit dem Unterkiefer wackeln, um ein klares Bild der Knochenkonturen zu erhalten. [28]

engl.: lack of definition due to motion
franz.: flou de mouvement

Bezugsreaktor. Bei der Durchrechnung eines Reaktors (der z. B. mit $U^{235} + U^{238}$ arbeitet) berücksichtigt man in der Reaktorgleichung zunächst die Produktion von Neutronen durch Spaltung von U^{235} und Schnellspaltung von U^{238}, die Absorption in U^{235}, U^{238}, Xe^{135}, Sm^{149} und in den Moderator-, Kühl- und Strukturmaterialien, sowie die Neutronenverluste durch Ausströmen aus dem Reaktor. Den so ermittelten Entwurf bezeichnet man als B. Diesem Entwurf würde ein Reaktor entsprechen, der erst ganz kurz in Betrieb steht und bei dem sich eben die Gleichgewichtskonzentrationen von Xe^{135} und Sm^{149} eingestellt haben, die Produktion von neuen Spaltstoffen, der Abbrand und die Konzentration von Spaltprodukten aber noch unerheblich sind.

Beim Reaktor im Betrieb treten nach einiger Zeit Vorgänge hinzu, die beim B. nicht berücksichtigt wurden:

Aufbau von U^{236}, U^{237}, Pu^{239}, Pu^{240}, Pu^{241}, Pu^{242}, Pu^{243} und der entsprechenden Spaltprodukte, sowie der Abbrand von U^{235}, U^{238} und der neu entstandenen Substanzen. Außerdem ist der Entzug und die Zuführung verschiedener Substanzen von außen in Rechnung zu stellen. Diese Vorgänge, welche das Langzeitverhalten des Reaktors charakterisieren, werden zweckmäßigerweise auf die Anfangsverhältnisse des Reaktors, d. h. auf den B. bezogen. [13]

engl.: reference reactor design

franz.: réacteur témoin, réacteur de comparaison

Biegefestigkeit, s. Biegeversuch.

engl.: bending strength

franz.: résistance à la flexion

Biegeversuch. Prüfungsverfahren zur Bestimmung der Biegespannungen, welches besonders bei spröden Stoffen zur Verwendung kommt. Die stabförmige Probe liegt an ihren Enden frei auf und wird in der Mitte oder an zwei symmetrisch zur Mitte gelegenen Stellen belastet. Gemessen wird der Zusammenhang zwischen Durchbiegung (angegeben in % bezogen auf die Stützweite) und Biegespannung (berechnet aus Belastung und Querschnittsabmessung der Probe). Diejenige Biegespannung, bei welcher der Bruch erfolgt, nennt man Biegefestigkeit σ_{bB} (in kg/mm²). Daneben unterscheidet man noch andere Grenzwerte der Biegespannung, z. B. die Elastizitätsgrenze $\sigma_{b\,0,01}$ und die Biegegrenze $\sigma_{b\,0,2}$ (beide in kg/mm²), die einer bleibenden Durchbiegung von 0,01 % bzw. 0,2 % entsprechen. [4]

engl.: bend test *franz.: essai de flexion*

Lit.: DIN 50 110.

Bildreaktor. Nimmt man an, daß die *Extrapolationsstrecke d unabhängig von der Neutronenenergie ist, und daß der Reaktor homogen bis zum Rand ist, so kann man den Neutronenfluß dieses Reaktors bis ins Unendliche analytisch fortsetzen, und den Integralkern für die Berechnung dieses Flusses durch einen solchen für ein unendlich ausgedehntes Medium ersetzen. Die Mehrzahl der Lösungen für den Fluß oszilliert. Sie überlagern sich derart, daß die Randbedingungen an der extrapolierten Grenze erfüllt sind. Zu den außer-

halb des Reaktors formal berechneten Flüssen denkt man sich zwischen den jeweiligen Nullstellen virtuelle Reaktoren, die man B.n nennt. Soweit die Flüsse negativ sind, spricht man auch von negativen Reaktoren. [7]
engl.: image reactor
franz.: réacteur virtuel

Binär-Untersetzer = Dual-Untersetzer, s. Untersetzer. [6]
engl.: binary scaler
franz.: demultiplicateur binaire

Bindungsenergie, die Energiedifferenz einer Anhäufung aneinander gebundener Teilchen gegenüber dem Zustand, wo die einzelnen Teilchen getrennt (in unendlicher Entfernung voneinander) sind. Sind die Teilchen Atome, die zu einem Molekül zusammentreten, so haben wir die B. einer chemischen Bindung. Sind die Teilchen Nukleonen, die einen Kern bilden, so handelt es sich um die B. des Kerns. Da dem Zustand der getrennten Teilchen gewöhnlich die Energie Null zugeschrieben wird, und beim Zusammentreten der Teilchen Energie frei wird, ist die B. eine negative Größe. Je größer sie, absolut genommen, ist, desto fester ist die Bindung. Die B. von Molekülen rechnet nach eV. Die B. der Kerne steigt von 2,2 MeV beim Deuteron auf 1780 MeV beim Urankern; bei den mittelschweren und schweren Kernen beträgt die B. ca. 8 MeV je Nukleon. [1]
engl.: binding energy
franz.: énergie de liaison

Biophysik, Lehre von den physikalischen Vorgängen im Organismus. [28]
engl.: biophysics
franz.: biophysique

Bisquit. In der angelsächsischen Literatur verwendete Bezeichnung für das feste metallische Produkt (Me_I), das bei der Reduktion einer Metallverbindung (Me_IO) durch ein chemisch aktiveres Metall (Me_{II}) in einer Bombe oder in einem Ofen entsteht nach der Gleichung $Me_IO + Me_{II} = Me_{II}O + Me_I$ (zum Beispiel $UO + Ca = CaO + U$). [4]
engl.: biscuit *franz.: biscuit*

Bläschen-Gasometer, Meßgerät für kleine Gasmengen, bei dem das Gas in Form kleiner Bläschen durch eine Flüssigkeit perlt. Die Zahl der Bläschen ist proportional der Gasmenge. Mäßige Genauigkeit, aber leicht herstellbar. [6]
engl.: bubble gauge
franz.: compteur volumétrique à bulles

Blase. Hohlräume, welche sich an der Oberfläche oder im Inneren eines metallischen Werkstückes bilden und mit Gasen gefüllt sind. Die Gase können entstehen bei der Erstarrung des Metalls, wo die Löslichkeit für Gase stark abnimmt, beim Beizen und bei elektrolytischen Vorgängen, wo Gase (z. B. Wasserstoff) entstehen, die in das Metall eindiffundieren und nicht im gelösten Zustand verbleiben, sowie bei chemischen Umsetzungen innerhalb des Metalls (z. B. Wasserstoffkrankheit des Kupfers). Im letzteren Fall können auch Blasen, welche feste Stoffe enthalten, entstehen. [4]
engl.: blister
franz.: soufflure

Blasenkammer (Glaser-Kammer), eine Vorrichtung zum Nachweis und zur Sichtbarmachung der Spuren energiereicher ionisierender Teilchen, die eine gewisse Ähnlichkeit mit der Wilsonschen Nebelkammer hat. In der B. verursacht jedoch die Ionisation entlang einer Teilchenbahn keine Kondensation von Tröpfchen in einem übersättigten Dampf, sondern gerade umgekehrt die Bildung winziger Dampfbläschen in einer überhitzten Flüssigkeit. Als Flüssigkeit für B.n dient z. B. Äther, neuerdings aber meist flüssiger Wasserstoff, der den Vorteil hat, daß in ihm die Teilchen nur mit Protonen reagieren können. [1]
engl.: bubble chamber
franz.: chambre à bulles
Lit.: W. B. Fretter, Cloud chambers and bubble chambers, in: Annual Rev. of Nuclear Science, Vol. 5, Stanford (Calif.), 1955.

Blasenkoeffizient der Reaktivität, die durch den Dampfblasengehalt des als Kühlmittel und Moderator dienenden Wassers verursachte Reaktivitätsänderung, bezogen auf das Volumen, das vom Dampf eingenommen wird. Der B. kann positiv oder negativ sein. Aus Sicherheitsgründen wird bei der Konstruktion eines

Siedewasserreaktors ein negativer B. angestrebt. Letzteres erreicht man durch geeignete Wahl des Volumenverhältnisses von Brennstoff zu Moderator (bei $H_2O \sim 1:2$). Bei zu großer Moderatormenge wirkt sich ihre Reduzierung durch Dampfblasen überwiegend in einer Verkleinerung der Neutronenabsorption, also in einem Reaktivitätsanstieg aus. Außerdem sind auch die Brennstoffelement-Konstruktion (bei Doppelgitterelementen Einfluß auf *p*-Faktor) und die Abmessungen des Reaktorkerns (Einfluß auf Neutronen-Ausströmung) von Bedeutung. Der mittlere Dampfgehalt in der Spaltzone des Reaktors liegt bei den heutigen Siedewasserreaktoren zwischen 10 und 20 %. Aus Stabilitätsgründen vermeidet man einen Dampfblasengehalt, durch den mehr als etwa 2,5 % Reaktivität kompensiert werden. Die genaue Größe dieses „kritischen" Wertes hängt von der Konstruktion und vom Betriebsdruck des Reaktors ab. Überschreitet man ihn, so setzen Leistungsschwingungen mit wachsender Amplitude ein.
Synom zu B. wird *Leerraumkoeffizient gebraucht. Der Gebrauch dieses Wortes ist wegen seines allgemeineren Charakters zu empfehlen. [21]
engl.: void coefficient
franz.: coefficient de vides, c. de bulles

Blasenverdampfung, s. Wärmeübergang bei Verdampfung und Dampferzeugung.
engl.: bulk boiling
franz.: ébullition

Blei (Pb). Schwermetall mit der Dichte 11,34; Ordnungszahl 82, Atomgewicht 207. Schmelzpunkt 327 °C, Siedepunkt 1740 ° C. Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen $\Sigma_a = 0{,}006\ \mathrm{cm}^{-1}$. Kristallstruktur: kubisch flächenzentriert.
Reines Blei ist sehr weich und zeigt bei Verformung keine bleibende Verfestigung. Daher kommt es als Konstruktionswerkstoff nur in besonderen Fällen in Betracht (Wasserrohre, Säurekammern, Kabelummantelungen). Blei ist geeignet zu Abschirmungen gegen Röntgen- und Gammastrahlen. – Legierungen des Bleis mit Zinn und Antimon finden Anwendung als *Druckgußlegierungen, Letternmetall und Weichlote. –

Stabile Bleiisotope sind die Endprodukte der radioaktiven Zerfallsreihen. [4]
engl.: lead
franz.: plomb

Bleiglas ist ein Glas mit einem sehr hohen Prozentsatz an PbO (bis zu 80 Gew.-%) und einer Dichte bis zu etwa 6 g/cm³. Es dient zur Abschirmung von γ-Strahlen. Seine Abschirmwirkung entspricht etwa der des Eisens oder 50 % der des Bleis. [26]
engl.: lead glass
franz.: verre au plomb

Bleigleichwert, svw. Bleiäquivalenz. Bei dieser Angabe wird der Grad der Schwächung von ionisierender Strahlung durch Abschirmstoffe auf eine in dieser Hinsicht äquivalente (gleichwertige) Schichtdicke Blei bezogen. Zur Vereinheitlichung der Angaben wird der Schutzwert der Abschirmstoffe gegenüber ionisierender Strahlung stets in „Bleiäquivalenz" bei genau anzugebender Strahlenzusammensetzung angegeben. [28]
engl.: lead equivalence
franz.: équivalence de plomb

Bleigummi, Abschirmstoff, der in Form von Handschuhen, Schürzen, Abdecklappen etc. in Diagnostik und Oberflächentherapie weitgehende Verwendung findet. Er besteht aus flexiblem Kunststoff, in den Bleiverbindungen zur Erhöhung der strahlenabsorbierenden Wirkung eingelagert sind. [28]
engl.: lead-impregnated rubber
franz.: caoutchouc au plomb

Bleischürze, Schürze aus bleihaltigem Material zum Schutz gegen Röntgen-Strahlung nicht zu hoher Erzeugungsspannung. Wird z. B. von Ärzten an *Diagnostikröhren getragen. [17]
franz.: tablier de plomb

Bleialter ist das Alter eines radioaktiven Minerals, das auf Grund seines Bleigehalts berechnet ist. Dazu ist nötig zu wissen, aus welchem Atomkern und mit welcher Halbwertszeit das Blei entstanden ist und ob die Bleibildung bis heute angedauert hat. Diese Gewißheit ist immer gegeben, wenn die zerfallende Substanz nicht vollständig verschwunden ist. Eine solche Altersbestim-

mung bezeichnet man grundsätzlich nach dem radiogenen Endprodukt. Nach dieser Methode kann das Alter von Uran- und Thoriumerzen bestimmt werden. S. a. Altersbestimmung, radioaktive. [7]
engl.: lead age
franz.: âge de plomb

Blindversuch, probemäßiges Durchspielen des kritischen Experiments bei einem Wasserkocher unter Verwendung von Wasser anstelle des Brennstoffs. [7]
engl.: cold run *franz.: essai à blanc*

Blocking-Oscillator, s. Sperrschwinger.

Blutbild. Unter B. versteht man Nebeneinanderstellung der Werte des roten Blutfarbstoffes (Hämoglobin), der roten (Erythrozyten) und der weißen (Leukozyten) Blutkörperchen, sowie Auftrennung der verschiedenen Blutkörperchen (Bk.) in ihre einzelnen Formen (differentielles Blutbild). Der Hämoglobingehalt des peripheren venösen Blutes beim Erwachsenen beträgt im Mittel 14,35 g/100 ml. Rote Bk. im Mittel: 5,10 Millionen/mm^3, weiße Bk. im Mittel: 7000/mm^3. Die einzelnen Formen des roten und weißen Blutbildes sind: Retikulozyten (7,5 Promille der roten Bk.), Neutrophile (66 %), Eosinophile (1,5 %), Basophile (0,5 %), Lymphoyzten (26 %), Monozyten (6 %), ferner Blutplättchen (Thrombozyten: 500 000 bis 900 000/mm^3). [28]
engl.: blood-picture (haematologic state)
franz.: formule hématologique, formule sanguine

Blutzellenzahl, Gesamtzahl der je mm^3 des peripheren Blutes vorhandenen Blutkörperchen. Diese beträgt im Mittel für die roten Blutkörperchen 5,10 Millionen (Männer 5,43, Frauen 4,77). Der Normalbereich umfaßt 4,3–5,9 Millionen (Männer 5,1–5,77; Frauen 4,3–5,25); für die weißen Blutkörperchen 7000 im Mittel für Erwachsene. [28]
engl.: blood count *franz.: numération globulaire*

BMAt. Abk. für Bundesminister(ium) für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft. [24]

BNL. Abk. für *Brookhaven National Laboratory der *AEC in Upton, USA. [24]

BNL-Reaktor. Abk. für den Forschungsreaktor des amerikanischen *Brookhaven National Laboratory in

Upton. Nat. Uran, graphit-moderiert, luftgekühlt, 28 000 kW Wärmeleistung. In Betrieb seit 22. August 1950, ähnlich dem *Oak Ridge Reaktor X-10. [24]

Boden, theoretischer, s. Destillation und Rektifikation.

engl.: theoretical stage

franz.: étage théoretique

Bodenkolonne. Im Gegensatz zur *Füllkörpersäule vermag sie den Stoff- und Wärmeaustausch bei der *Rektifikation und *Solventextraktion wesentlich bes-

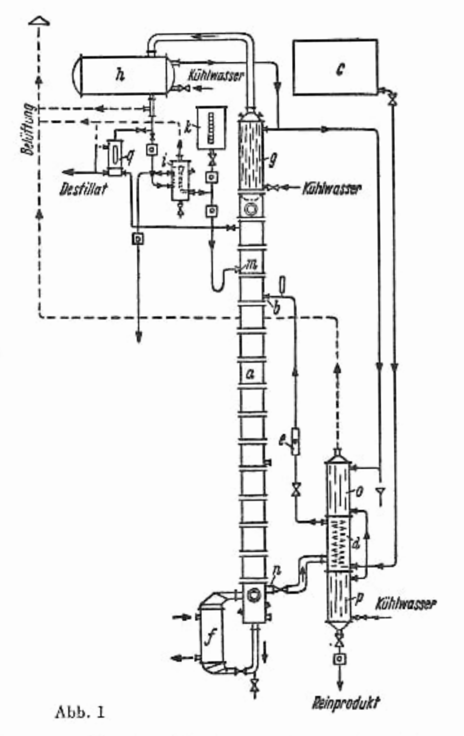


Abb. 1

ser zu verwirklichen, ist aber im Bau aufwendiger und daher teurer. An Stelle der Füllkörper enthält sie Einbauten in Form von horizontalen Böden, auf denen

sich der Austausch zwischen Dampf und Flüssigkeit im Gegenstrom, bei besseren Konstruktionen im Kreuzstrom (vgl. *Wärmeaustausch) vollzieht (Abb. 1). Die Trennwirkung eines praktischen Bodens ist nahezu gleich derjenigen eines theoretischen Bodens, u. U. sogar besser (Verstärkungsverhältnis > 1!). Es kommt darauf an, den Austausch so innig wie möglich zu gestalten, den Druckverlust so klein wie möglich zu halten, ein Mitreißen von Flüssigkeit im Dampf zu verhüten, den Bodenabstand so klein wie möglich zu machen, um Bauhöhe zu sparen (Problem bei schäumenden Flüssigkeiten!) usw. Der einfachste Boden ist der Siebboden (Abb. 3). Sein Nachteil ist, daß er leicht „durchschlägt", d. h. die Flüssigkeit vom Dampf einfach verdrängt und damit der Austausch unterbunden wird. Am weitesten verbreitet ist der Glokkenboden (Abb. 2) in sehr vielfältiger Konstruktionsform: Der Boden enthält eine mehr oder weniger

Bodenkolonne

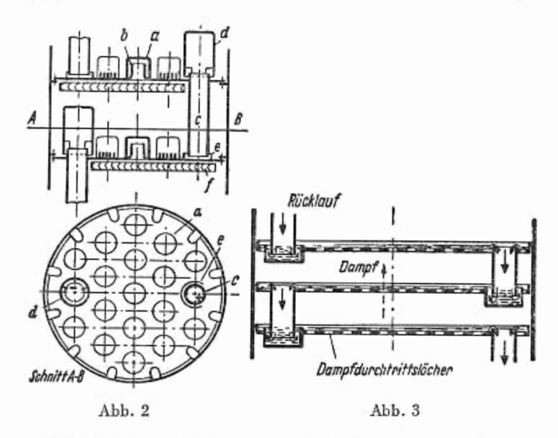


Abb. 2

Abb. 3

große Zahl von Stutzen, die ähnlich wie eine Kabinenhaube von glockenartigen Aufsätzen überdeckt sind. Der Flüssigkeitsstand auf dem Boden wird durch Überlaufvorrichtungen festgelegt. Die Strömungsvorgänge auf den Böden sind äußerst kompliziert und durchaus noch nicht in allen Einzelheiten geklärt. Die Grundformen sind empirisch entwickelt worden. Tech-

nische Ausführungen gehen bis 4000 mm Durchmesser und bis zu einigen hundert Böden. [2]

engl.: plate column

franz.: colonne à plateau (à cloches)

Lit.: E. Kirschbaum, Destillier- und Rektifiziertechnik, 2. Aufl., Berlin, 1950. – Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik.

Bohrsches Atommodell, s. Atommodell.

engl.: Bohr model

franz.: modèle de Bohr

Bohrsche Bahn, s. Atommodell.

engl.: Bohr orbit

franz.: trajectoire de Bohr

Bohrsches Magneton, das magnetische Moment, welches ein auf einer geschlossenen Bahn (beliebiger Form) mit einem Drehimpuls von $h/2\pi$ (h Plancksches Wirkungsquantum) umlaufendes Elektron ohne Berücksichtigung seines Spins nach klassischer Rechnung erzeugen würde. Es ist:

$$\mu_B = \frac{e\,h}{4\,\pi\,m_0\,c} = 0{,}927 \cdot 10^{-20}\ \text{Gauß cm}^3$$

(e und m_0 Ladung und Ruhmasse des Elektrons, c Lichtgeschwindigkeit).
Auch dem Eigendrehimpuls (Spin) des Elektrons kommt ein magnetisches Moment von (näherungsweise) $1\,\mu_B$ zu. [1]

engl.: Bohr magneton *franz.: magnéton de Bohr*

Bohrsche Theorie, s. Atommodell.

engl.: Bohr theory *franz.: théorie de Bohr*

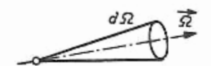
Boltzmann-Gleichung (Transportgleichung), beschreibt die *Neutronendiffusion (und die Diffusion anderer Teilchen) in strenger Form. Während die nur näherungsweise gültige *Diffusionsgleichung die Neutronendichte als Funktion von Ort, Zeit und Energie auffaßt, berücksichtigt die B.-G. außerdem noch die Richtungsverteilung der Neutronen. Überall, wo man keine quasi-isotrope Richtungsverteilung voraussetzen kann, muß man daher die B.-G. verwenden. Das ist vor allem bei sehr kleinen Systemen (z. B. homogene Leichtwasser-Reaktoren), wie auch bei Medien mit ausgeprägt heterogener Struktur der Fall.

Im einfachsten Fall kann man von der Energieverteilung der Neutronen absehen und ein stationäres Problem voraussetzen. In diesem Fall ist die monoenergetische, stationäre B.-G. zuständig. Sie formuliert einen Erhaltungssatz für die Neutronenzahl und verwendet als abhängige Variable den *Vektorfluß $\mathfrak{F}(\mathfrak{r}, \vec{\Omega}) = n(\mathfrak{r}, \vec{\Omega}) \cdot v\,\vec{\Omega}$. Unter $F = |\mathfrak{F}|$ ist die Zahl jener Neutronen der Geschwindigkeit v zu verstehen, die in der Zeiteinheit eine Einheitsfläche durchsetzen, welche auf Ω senkrecht steht. Die B.-G. lautet in diesem Fall:

Boltzmann-Gleichung

$$\operatorname{div} \mathfrak{F}(\mathfrak{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma F(\mathfrak{r}, \vec{\Omega}) =$$
$$= \int \Sigma_s(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') F(\mathfrak{r}, \vec{\Omega}') \, d\vec{\Omega}' + Q(\mathfrak{r}, \vec{\Omega}).$$

Das erste Glied in dieser Bilanzgleichung stellt das Ausströmen von Neutronen aus dem Volumelement dV in Rechnung, das zweite bucht sämtliche Teilchen, die einen Stoß erleiden, als Verlust (totaler Wirkungsquerschnitt $\Sigma = \Sigma_a + \Sigma_s$). Auf der rechten Seite stehen die Gewinne. Das Integral erfaßt jene Neutronen, die aus der Richtung $\vec{\Omega}'$ in die betrachtete Richtung Ω eingestreut werden. Das letzte Glied stellt den Beitrag einer äußeren Quelle dar.



Können die Neutronen im Medium nicht als monoenergetisch aufgefaßt werden, so ändert sich die obenstehende Gleichung formal nur unwesentlich. Der Vektorfluß und die Quelldichte werden energieabhängig, während das Integral auch über die Energien E' zu erstrecken ist, welche die Neutronen im „fremden" Richtungselement besitzen.

Ist das Problem zeitabhängig, so erhält man aus der obenstehenden Gleichung die zeitabhängige B.-G., indem man auf der linken Seite $\partial F / \partial t$ hinzufügt und alle Größen als zeitabhängig auffaßt.

Die allgemeinste Form der B.-G. in der Reaktorphysik ergibt sich, wenn man außerdem den Beitrag von Spaltungen und die dabei entstehenden verzögerten Neu-

tronen berücksichtigt. Man spricht in diesem Fall von der allgemeinen *Reaktorgleichung.

Durch Integration der energieabhängigen B.-G. über alle Richtungen und über das ganze Medium, so ergibt sich die nur von der Energie (und evtl. Zeit) abhängende *Bremsgleichung.

Die B.-G. kann nur für sehr wenige elementare Quellverteilungen und nur unter vereinfachenden Annahmen streng integriert werden. In allen praktisch interessierenden Fällen muß sie numerisch ausgewertet werden. Wegen der vielen Variablen ist es zweckmäßig, dazu eine elektronische Rechenmaschine zu verwenden. Aber auch mit der Maschine muß man zu passenden Näherungsverfahren greifen (s. Kugelfunktions-Methode, Carlsonsche Methode).

Entwickelt man die B.-G. nach Kugelfunktionen und bricht mit P_1 ab, so erhält man die sog. *P_1-Approximation, die ihrerseits eng mit der Diffusionsgleichung zusammenhängt. Die letztere kann also als elementare Näherung der B.-G. aufgefaßt werden.

Die B.-G. ist primär in der kinetischen Gastheorie entwickelt worden. Sie wird dort mitunter als *Maxwell-Boltzmann-Gleichung bezeichnet. S. a. Liouville-Gleichung. [13]

engl.: Boltzmann equation, transport equation

franz.: équation de Boltzmann

Lit.: A. Weinberg and L. Noderer, Theory of Neutron Chain Reactions, AECD-3471, 1951. – B. Davison, Neutron Transport Theory, Oxford, 1957.

Boltzmann-Statistik, s. Statistik.

Boltzmann-Verteilung, s. Verteilung.

Bor ist ein Element, das in der Kernphysik wegen seiner großen Neutronenabsorption wichtig geworden ist; seine Dichte ist 2,39, Ordnungszahl 5, Atomgewicht 11, Schmelzpunkt ungefähr 2300 °C, Siedepunkt ungefähr 2530 °C, $\sigma_{a,th} = 755$ b, Kristallstruktur ist nicht bekannt. Das Isotop ^{10}B, dessen natürliche Häufigkeit 18,8 % beträgt, zerfällt nach einer Neutronenabsorption spontan in die ionisierenden Teilchen He^4 und Li^7, die leicht registriert werden können:

$$^{10}\mathrm{B}(\mathrm{n}, \alpha)\,^{7}\mathrm{Li}, \quad \sigma = 4300\ \mathrm{b}\,.$$

Mit der Zählung dieser Teilchen erfaßt man praktisch

die Neutronen in einer mit B. ausgelegten Ionisationskammer oder im Bortrifluoridzählrohr, s. Neutronenzählrohr. – Die Neutronenabsorption durch B. ist umgekehrt proportional zur Neutronengeschwindigkeit. Wegen des hohen thermischen Wirkungsquerschnitts kann B. in der Form von Borstahl (neben Cadmium) als neutronenabsorbierender Regelstab im thermischen Reaktor verwendet werden. Außerdem findet man es im biologischen Schild des Reaktors, meist in Form eines Zuschlags borhaltiger Erde, z. B. Borkalzit, zum Beton. Sehr unerwünscht ist B. als Beimischung im Graphit, wenn man diesen als Moderator verwenden will. Hier muß B. auf weniger als $^1/_{1000}$ ‰ entfernt werden. [4, 7]
engl.: boron *franz.: bore*

Boral ist ein Aluminium-Borkarbid-Gemisch, das als Abschirmstoff verwendet wird. Die Herstellung erfolgt durch Sinterung der pulverförmigen Bestandteile Al und B_4C, die zu etwa 45 bis 55 Gewichts-Prozenten gemischt werden. Die fertige Substanz wird zu Platten der Dicke 6,35 mm ausgewalzt und beidseitig mit Aluminium der Dicke von etwa 0,5 mm verkleidet. B. hat eine Dichte von 2,5 g/cm^3 und brauchbare mechanische Eigenschaften. [26]
engl.: boral *franz.: boral*

Boräquivalent, Begriff zur Charakterisierung der Reinheit von Kernwerkstoffen, insbesondere der Reinheit von Uran. Man betrachtet den gemessenen, von der Summe aller Verunreinigungen herrührenden zusätzlichen Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen als nur von Bor herkommend und gibt an, wieviel *ppm Bor nötig sind, um diese zusätzliche Absorption hervorzurufen. Natürliches Uran für die Verwendung als Kernbrennstoff besitzt normalerweise einen Verschmutzungsgrad der Größenordnung 1 bis 10 ppm B., während der tatsächliche Borgehalt unter 0,5 ppm, evtl. sogar unter 0,2 ppm liegt. [20]
engl.: boron equivalent
franz.: équivalent (de) bore

BORAX. Abk. für Boiling Reactor Experiment, eine Reihe von Experimenten mit Versuchsreaktoren des *Siedewassertyps, durchgeführt von dem *Argonne

National Laboratory der AEC bei der *National Reactor Testing Station in Arco, Idaho, USA.
BORAX I, kleiner Versuchsreaktor, angereichertes Uran, wasser-moderiert, 1953 in Betrieb genommen, 1954 bei Versuchen zerstört, diente der Erforschung der Betriebsfähigkeit dieses Typs.
BORAX II, Fortsetzung der BORAX-Experimente, 6000 kW Wärmeleistung, seit 19. Oktober 1954 in Betrieb, 1955 durch BORAX III ersetzt.
BORAX III, 15 000 kW Wärmeleistung, von 9. Juni 1955 bis April 1956 in Betrieb. Installation eines 3500-kW-Turbogenerators, durch den erstmals am 17. Juli 1955 der Ort Arco mit Elektrizität versorgt wurde. Prototyp des *EBWR-Reaktors.
BORAX IV, seit 1957 in Betrieb. – Näheres s. Reaktortabelle im Anhang. [24]

Boraxal ist ein Abschirmstoff ähnlich dem Boral. An Stelle von B_4C wird beim B. B_2O_3 verwendet. Deswegen ist B. billiger als Boral, es hat aber auch etwas weniger B.-Atome pro Volumeneinheit. B. wird wie Boral hergestellt. [26]
engl.: boraxal
franz.: boraxal

Borcalzit ist ein Mineral der Zusammensetzung $CaB_4O_7 \cdot 4\,H_2O$. [26]
engl.: borocalcite *franz.: borocalcite*

Borfritt ist ein Bor-Silizium-Gemisch, das man durch Frittung (Sinterung) von Borax mit Kieselsäure erhält. [26]
engl.: boron frits *franz.: borfritt*

Borfritt-Baryt-Beton besteht aus Baryt, Borfritt und Portlandzement. Seine Dichte ist etwa 3,1 g/cm^3, seine Zusammensetzung in Gew.-%: 40 % Ba; 33 % O; 9 % S; 6 % Ca; 2 % Fe; 3 % Si; 1 % B; Rest: H, Mg, Na, Al, Mn, Zn, K, F; s. a. Schwerbeton. [26]
engl.: boron frits-barytes concrete

Borkammer, s. Ionisationskammer.

Bornsche Streuformel, s. Streuformeln.

Bortrifluorid = BF_3. Gas, das als Füllung für Zählrohre Verwendung findet, mit denen thermische Neutronen nachgewiesen werden sollen ($^{10}B(n,\alpha)^7Li$).

Vielfach wird das im natürlich vorkommenden Bor nur zu ca. 20 % vorhandene Isotop B 10 angereichert. Die durch das abgespaltene Alphateilchen entstehende Ionisation ist gegen die Ionisation durch vorhandene Gammastrahlung leicht durch *Diskriminatoren zu unterscheiden. [6]
engl.: boron trifluoride *franz.: trifluorure de Bore*

Borzählrohr, s. Neutronenzählrohr.

Bourdon-Manometer, Druckmeßgerät, bei dem die Differenz eines inneren und äußeren Druckes ein spiralförmig gebogenes, flaches Rohr zu strecken oder stärker zu biegen sucht. Robustes Gerät mittlerer Genauigkeit. [6]
engl.: Bourdon spiral, Bourdon gauge
franz.: manomètre-spirale

Bose-Einsteinsche-Verteilungsfunktion, s. Verteilung.

Bose-Einstein-Statistik, s. Statistik.

Bosonen, Sammelname für die Teilchen, die der Bose-Einstein-Statistik genügen, also ganzzahligen Spin haben. Von den Elementarteilchen sind B.: Lichtquanten, π-Mesonen und die meisten schwereren Mesonen, von zusammengesetzten Teilchen alle geradzahligen Atomkerne, insbesondere das Deuteron (Spin 1) und das α-Teilchen (Spin 0). Gegensatz: *Fermionen. [7]
engl.: bosons *franz.: bosons*

Le Bouchet. Uranaufbereitungsanlage des französischen Atomenergiekommissariats (*CEA) bei Corbeil, ca. 50 km von Paris. Herstellung kernphysikalisch reinen *Uranmetalls für die französischen Reaktoren, seit 1948 in Betrieb. [24]

BR-1. Abk. für Belgian Reactor No. 1, den ersten belgischen Forschungsreaktor (3000 kW Wärmeleistung, nat. Uran als Brennstoff, Graphit als Moderator), der am 1. Mai 1956 in Betrieb genommen wurde. [24]

Bradwell Nuclear Power Station, im Bau befindliches britisches Kernkraftwerk (300 MW el.) vom Calder-Hall-Typ. [13]

Braggsche Kurve. Die Zahl der pro Zentimeter Weg durch α-Strahlen in Luft oder anderen Gasen erzeug-

ten Ionenpaare nimmt entlang dem Strahl wegen der Geschwindigkeitsabnahme der α-Teilchen immer mehr zu, um dann in der Gegend der Reichweite rasch auf Null abzufallen. Der Gang der Ionisierungsdichte mit dem Abstand von der Strahlenquelle wird als B. K. bezeichnet. [1]

engl.: Bragg curve *franz.: courbe de Bragg*

Brechungsindex eines Plasmas, s. Wellen, elektromagnetische, im Plasma.

Breit-Wigner-Formel gibt den Wirkungsquerschnitt $\sigma(E)$ für eine Kernreaktion (Streuung, Absorption, Spaltung) unter Bezug auf ein Resonanzniveau des Kerns an der Stelle E_0 an. In der Praxis handelt es sich meist um Wirkungsquerschnitte gegenüber Neutronen. Wenn Neutronen an einem bestimmten Kern die Prozesse Spaltung (f), Einfang (e) und Streuung (s) auslösen könnten, dann lauten die B.-W.-F.n für diese drei Prozesse (Bahndrehimpuls des Neutrons relativ zum Kern ist 0 gesetzt):

$$\sigma_f = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{\Gamma_n \cdot \Gamma_f}{(E - E_0)^2 + \frac{1}{4} \cdot \Gamma^2},$$

$$\sigma_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{\Gamma_n \cdot \Gamma_\gamma}{(E - E_0)^2 + \frac{1}{4} \cdot \Gamma^2},$$

$$\sigma_s = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{\Gamma_n^2}{(E - E_0)^2 + \frac{1}{4} \cdot \Gamma^2}. \qquad (1)$$

Dabei ist λ die Materiewellenlänge des ankommenden Neutrons, die Größe Γ_n mißt die Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Neutron absorbiert wird. Sie ist die Halbwertsbreite des für diesen Prozeß charakteristischen Niveaus (s. Linie). Der zweite Γ-Faktor im Zähler ist nun verschieden, je nach dem, ob es sich um eine Spaltung (Γ_f), einen Einfang unter Emission eines γ-Quants ($\Gamma\gamma$) oder um eine Streuung, d. h. Wiederaussendung des Neutrons (Γ_n) handelt. Die Größen unter dem Bruchstrich stellen einen typischen Resonanznenner dar. Die dort auftretende Größe Γ ist die Summe aller möglichen Γ_i, also

$$\Gamma = \Gamma_f + \Gamma_\gamma + \Gamma_n. \qquad (2)$$

Ist $\Gamma \ll E_0$ (Normalfall), so bekommt man eine Resonanzlinie, die eine relativ geringe Breite auf der Ener-

gieskala einnimmt. Ist außerdem $E \ll E_0$, so ist der Nenner von der Neutronenenergie kaum beeinflußt und man erhält für die Abhängigkeit von der Neutronengeschwindigkeit v

$$\sigma_f = \frac{\text{const}}{v}, \quad \sigma_e = \frac{\text{const}}{v}, \quad \sigma_s = \text{const}. \qquad (3)$$

Gemäß (3) nimmt also der Spaltquerschnitt wie der Einfangquerschnitt proportional $1/v$ ab, bis die Energie in die Nähe der ersten Resonanzstelle kommt ($1/v$-Gesetz, s. Gesetz, $1/v$). Der Streuquerschnitt dagegen ist von der Neutronenenergie unabhängig. Es gibt aber auch Fälle, bei denen die Resonanzbreite Γ groß oder vergleichbar mit E_0 ist. Dann tritt die eigentliche Resonanzspitze gar nicht mehr auf. Ist nämlich E in der Nähe von E_0, so daß $|E - E_0| \ll \Gamma/2$, so variieren die Nenner in (1) praktisch nicht mit der Energie. Folglich gilt wieder (3). Allerdings ist in diesem Fall, da im Resonanzgebiet befindlich, der Absolutbetrag des Wirkungsquerschnitts groß. Beispiele für diesen letzten Fall sind die großen thermischen Spalt- und Einfangquerschnitte des Urans 235 und Plutoniums 239 (s. Tabelle bei spaltbar). [7]

engl.: Breit-Wigner formula
franz.: formule de Breit et Wigner

Bremsdichte $q(E)$ ist definiert als die Zahl von Neutronen, die von einer Energie oberhalb nach einer Energie unterhalb E abgebremst werden, bezogen auf 1 cm^3 und 1 s. Sie spielt in der *Reaktorgleichung in Diffusionsnäherung eine Rolle, da sie, multipliziert mit der *Bremsnutzung, die Quelle der thermischen Neutronen beschreibt. Die B. gehorcht der *Bremsgleichung, d. i. im einfachsten Fall die Fermische *Altersgleichung.

In einem nicht absorbierenden Medium, in dem Verluste durch die Oberfläche zu vernachlässigen sind, ist $q(E) = \text{const} =$ Quellstärke Q, wenn man einen gewissen Abstand von der Quellenergie hat und mit einer quasikontinuierlichen Bremsung rechnen kann. Formelmäßig ist

$$q(E) = \Phi(E) \cdot \xi \cdot \Sigma_s \cdot E = Q, \qquad (1)$$

da $\Phi(E) \sim 1/E$ ($\xi \Sigma_s$ Bremsvermögen). Wenn das Medium absorbiert, gilt

$$\frac{q(E)}{q(E_0)} = \exp\left\{-\int_{E}^{E_0} \frac{\Sigma_a}{\xi(\Sigma_s + \Sigma_a)} \cdot \frac{\mathrm{d}E}{E}\right\} = p(E), \tag{2}$$

$p(E)$ heißt Bremsnutzung, das Integral in (2) ist das (gewöhnliche) *Resonanzintegral. [7]
engl.: slowing-down density
franz.: densité de ralentissement

Bremsgleichung, eine Integralgleichung, welche die Energieverteilung der Neutronen in einem Moderator beschreibt. Durch Integration der *Boltzmann-Gleichung über alle Richtungen und das gesamte Volumen des Moderators ergibt sich eine nur von der Energie abhängige Integralgleichung für die *Stoßzahldichte $F(E)$:

$$F(E) = \int_{E}^{\infty} \frac{\Sigma_s(E')}{\Sigma(E')} g(E, E') F(E') \, \mathrm{d}E' + Q(E).$$

In dieser Form bezieht sich die B. auf ein unendlich ausgedehntes homogenes Medium mit homogen verteilten Neutronenquellen $Q(E)$. Darin bedeutet Σ_s den *Streuquerschnitt und Σ den totalen *Wirkungsquerschnitt, während unter $g(E, E')$ die „Streuwahrscheinlichkeit" zu verstehen ist, also die Wahrscheinlichkeit dafür, daß Neutronen mit der Energie E' nach einer Streukollision, im Energieintervall $\mathrm{d}E$ bei E landen. Die B. ist damit – so wie die Boltzmann-Gleichung – eine Neutronenbilanz, nur daß hier die räumliche und winkelmäßige Verteilung außer Betracht bleibt.

Als B. wird auch die Integralgleichung

$$q(E) = \int_{E}^{\infty} \frac{\Sigma_s(E')}{\Sigma(E')} G(E, E') F(E') \, \mathrm{d}E'$$

für die *Bremsdichte $q(E)$ bezeichnet. Unter $G(E, E')$ ist hier die „Bremswahrscheinlichkeit" zu verstehen,

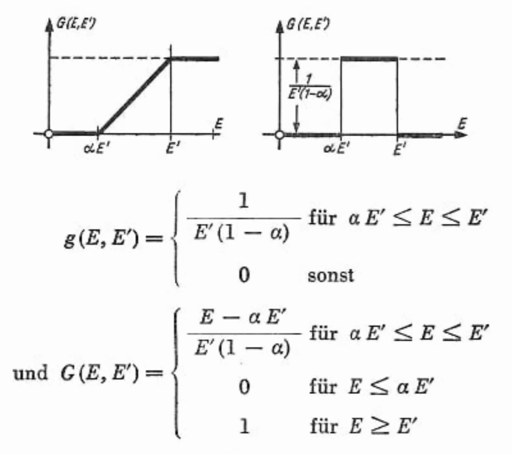
also die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Neutron der Energie E' nach einer Streukollision unter der Energie E landet. Die Funktion $G(E, E')$ hängt mit $g(E, E')$ durch die Beziehung

$$G(E, E') = \int_0^E g(E'', E')\,\mathrm{d}E''$$

zusammen, wobei $G(E, E) = 1$ ist. Daraus folgt wieder ein Zusammenhang zwischen $F(E)$ und $Q(E)$:

$$\frac{d}{\mathrm{d}E}\, q(E) = \frac{\Sigma_a}{\Sigma}\, F(E) - Q(E).$$

Falls die Bremsung speziell durch elastische Streuung erfolgt, die im Schwerpunkt-System isotrop ist (s. elastische Streuung), so gilt (s. Abb.):



$$g(E, E') = \begin{cases} \dfrac{1}{E'(1-\alpha)} & \text{für } \alpha E' \leq E \leq E' \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\text{und } G(E, E') = \begin{cases} \dfrac{E - \alpha E'}{E'(1-\alpha)} & \text{für } \alpha E' \leq E \leq E' \\ 0 & \text{für } E \leq \alpha E' \\ 1 & \text{für } E \geq E' \end{cases}$$

Dabei ist $\alpha = (A-1)^2/(A+1)^2$ und A die Massenzahl der streuenden Kerne. Für Wasserstoff als Moderator ($\alpha = 0$) kann die B. leicht gelöst werden und führt auf die Bremsdichte

$$q(E) = \int_E^\infty \frac{\Sigma_s(E')}{\Sigma(E')}\, Q(E') \exp\left[-\int_E^{E'} \frac{\Sigma_a}{\Sigma}\, \frac{\mathrm{d}E}{E}\right] \mathrm{d}E'.$$

Bei schwereren Moderatoren ($A > 1$) ist eine unmittelbare Lösung wegen des sprunghaften Verhaltens von $g(E, E')$ erschwert (s. Stoßdichte). Man kann g durch die *Bremskerne von Fermi, Wigner oder Greuling-Goertzel approximieren. In der Approximation von Fermi geht die B. in die *Altersgleichung über. [13]

engl.: slowing down equation

franz.: équation de ralentissement

Lit.: R. E. Marshak, Theory of the Slowing Down of Neutrons bz 1947. – Reactor Handbook, Vol. I (AECD-3645), Verl. McGraw-Hill, New York, 1956.

Bremskerne treten in der Reaktortheorie in zweifacher Bedeutung auf.

1. Im Zusammenhang mit der *Bremsgleichung für das unendlich ausgedehnte homogene Medium bezeichnet man die *Bremswahrscheinlichkeiten $g(E, E')$ als B. Für die elastische Streuung ist $g(E, E')$ beim Stichwort Bremsgleichung angegeben. Wegen des sprungartigen Verhaltens dieser Funktion ist eine einfache Lösung der Bremsgleichung nur für Wasserstoff als Moderator möglich. Es ist daher zweckmäßig, $g(E, E')$ durch einen der folgenden „synthetischen" B. zu approximieren:

Synthetische Bremskerne $g(E, E')$ nach

Wigner	$\frac{1}{\xi E}\left(\frac{E}{E'}\right)^{1/\xi}$ für $E \leq E'$ 0 für $E > E'$
Greuling Goertzel	$\frac{1}{\varepsilon^2 \xi E}\left(\frac{E}{E'}\right)^{1/\varepsilon\xi} + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)\delta(E - E')$ für $E \leq E'$ 0 für $E > E'$
Fermi	$\xi E' \delta'(E - E') + \delta(E - E')$

Dabei bedeutet ξ den mittleren logarithmischen *Energieverlust pro Stoß, während ε durch $\overline{\xi^2}/2\,\xi^2$ definiert ist. Bei Verwendung dieser B. geht die Integralgleichung für die *Stoßdichte $F(E)$ über in

$$\frac{d}{dE}\left(E\,\frac{\Sigma_s+\varepsilon\,\Sigma_a}{\Sigma}\,F\right)-\frac{\Sigma_a}{\xi\,E(\Sigma_s+\varepsilon\,\Sigma_a)}\cdot$$
$$\cdot\,E\,\frac{\Sigma_s+\varepsilon\,\Sigma_a}{\Sigma}\,F+\left(\frac{1}{\xi}-\varepsilon\right)Q-\varepsilon\,E\,\frac{dQ}{dE}=0\,.$$

Dabei ist ε entweder 1 (Wigner), 0 (Fermi) oder 1 für Wasserstoff und $\approx 2/3$ für schwerere Streuer (Greuling-Goertzel).

2. In der *Reaktorgleichung nach Weinberg treten ebenfalls B. auf, die im Gegensatz zu den oben erwähnten raumabhängig sind. Man kann die *Bremsdichte $q(\mathfrak{r}, E)$ in der Form

$$q(\mathfrak{r},E)=\int\limits_R\left[\frac{k_\infty}{p}\,\Sigma_a\,\Phi(\mathfrak{r}_0)+Q(\mathfrak{r}_0)\right]P(\mathfrak{r},\mathfrak{r}_0,E)\,dV_0$$

ausdrücken. Die Funktion $P(\mathfrak{r}, \mathfrak{r}_0, E)$ gibt darin die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß ein am Ort $\mathfrak{r}_0$ erzeugtes Spaltneutron am Punkt $\mathfrak{r}$ auf die Energie E abgebremst wird und wird ebenfalls als B. bezeichnet. Mit $k_\infty\,\Sigma_a\,\Phi(\mathfrak{r}_0)/p$ wurde dabei die pro s und cm^3 entstehende Zahl von Spaltneutronen bezeichnet, mit $Q(\mathfrak{r}_0)$ der Beitrag einer äußeren Quelle. Ist die *Alterstheorie der Neutronenbremsung anwendbar, so ist für P der sog. Gaußsche B.

$$P(\mathfrak{r},\mathfrak{r}_0,\tau)=\frac{1}{(4\,\pi\,\tau)^{3/2}}\exp\left[-\frac{|\mathfrak{r}-\mathfrak{r}_0|^2}{4\,\tau}\right]$$

zu setzen, wobei unter τ das *Fermi-Alter der Neutronen bei der Energie E zu verstehen ist. Falls die Alterstheorie nicht anwendbar ist (Leichtwasser), kann man u. U. eine *Faltung von B. benützen. [13]

engl.: slowing down kernels

franz.: noyaux de ralentissement

Lit.: Reactor Handbook, Physics, (AECD-3645), Verl. McGraw-Hill, New York, 1955. – S. Glasstone and M. C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand, New York, 1952, Kap. XII.

Bremskraft, syn. zu Bremsvermögen. Das Wort sollte zur Vermeidung von Mißverständnissen nicht benutzt werden. [7]

Bremslänge ist ein Maß für diejenige (geradlinige) Strecke, die ein Neutron während des Bremsprozesses zurücklegt. Entsteht es etwa als Spaltneutron an der Stelle $r = 0$, so ist nach der Fermischen *Alterstheorie (kontinuierliche Bremsung) die Aufenthaltswahrscheinlichkeit je nach Alter τ gegeben durch

$$q(r, \tau) = \frac{e^{-r^2/4\tau}}{(4\pi\tau)^{3/2}}, \qquad \tau = \tau(E). \tag{1}$$

Den mittleren quadratischen Abstand des Neutrons von der Stelle $r = 0$ findet man zu

$$\overline{r^2(\tau)} = \frac{\int_0^\infty r^2 \, [4\pi r^2 \cdot q(r, \tau)] \, dr}{\int_0^\infty 4\pi r^2 \cdot q(r, \tau) \, dr} = 6\tau. \tag{2}$$

$\sqrt{\tau_{th}} = \sqrt{\overline{r^2_{th}}/6}$ heißt B. der thermischen Neutronen. τ_{th} ist derjenige τ-Wert, der den zu beobachtenden Neutronen (z. B. zwecks Bestimmung der Spaltwahrscheinlichkeit in einem thermischen Reaktor) zugeordnet ist. Die B. hängt natürlich von der Entstehungsenergie und der Beobachtungsenergie ab. Gewöhnlich meint man als Entstehungsenergie die der Spaltneutronen und als Beobachtungsenergie die der Betriebstemperatur des Reaktors. [7]
engl.: slowing-down length
franz.: parcours de ralentissement

Bremsmittel in Reaktoren, svw. Moderator.

Bremsnutzung p gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß ein schnelles Neutron im Reaktor während des Bremsprozesses nicht eingefangen wird, sondern geringe Energien erreicht. Dabei ist vorausgesetzt, daß es nicht durch den Rand abdiffundieren kann. Meist betrachtet man die Abbremsung von der Spaltenergie bis auf die Betriebstemperatur des Reaktors. Der größte Teil der verloren gehenden Neutronen wird durch die

Resonanzstellen des Kernbrennstoffes (Uran) absorbiert. Daher rührt die englische Benennung von *p*. *p* ist zu berechnen mit Hilfe des *Resonanzintegrals *I* über $p = e^{-I}$. S. a. Neutronenbremsung. [7]
engl.: resonance escape probability
franz.: probabilité de fuite de neutrons
Lit.: s. Neutronenbremsung.

Bremsquerschnitt. In der *Gruppendiffusionstheorie werden die Neutronen zu einzelnen Energiegruppen zusammengefaßt. Infolge der Bremsung werden Neutronen von Gruppen mit höherer Energie an Gruppen mit niedrigerer Energie abgegeben. Die Zahl ist proportional dem Neutronenfluß in dieser Gruppe. Der Proportionalitätsfaktor Σ heißt B., Dimension cm^{-1}. Das Produkt $\Sigma\,\Phi$ hat für die betrachtete Gruppe dieselbe Bedeutung wie eine echte Absorption. Der B. ist daher parallel zum makroskopischen Absorptionsquerschnitt zu behandeln, wenn auch die Grundlagen nicht in einer Absorption, sondern in dem Bremsprozeß liegen. Formelmäßig ist der B. der schnellsten Gruppe gegeben durch

$$\Sigma_1 = \frac{\Sigma_s}{1/\xi \ln E_0/E_1}\,.$$

Dabei ist Σ_s der mittlere makroskopische Streuquerschnitt der Gruppe, E_0 die mittlere Energie der Spaltneutronen (2 MeV), E_1 die untere Grenze dieser Gruppe. Der Nenner bedeutet die Zahl der Stöße, die erforderlich ist, um ein Neutron von E_0 auf E_1 abzubremsen. [7]
engl.: slowing-down cross section
franz.: section efficace d'arrêt

Bremsspektrum (kontinuierliche Röntgenstrahlung) entsteht, wenn beschleunigte Elektronen auf Materie treffen. Das B. hat eine scharfe Grenze nach kurzen Wellenlängen (Grenzwellenlänge) und bei einer mittleren Wellenlänge ein Maximum.
Die Grenzwellenlänge λ_0 steht mit der Spannung U, durch die die Elektronen beschleunigt werden, in folgender Beziehung

$$\lambda_0 = \frac{h\,c}{e} \cdot \frac{1}{U}$$

(h Plancksches Wirkungsquantum, c Lichtgeschwindigkeit, e Elementarladung).

Daraus folgt (U in kV)

$$\lambda_0 = \frac{12{,}34}{U} \text{ [Å]} .$$

Der Energiegehalt I des B. ist der Ordnungszahl Z der Materie, auf die die Elektronen treffen (Antikathode, Auffänger) und dem Quadrat der Spannung U proportional:

$$I = \alpha \cdot Z U^2 .$$

α ist eine empirische Konstante und beträgt etwa $8 \cdot 10^{-10} e \cdot V^{-1}$. [17]

engl.: bremsspectrum

franz.: spectre du rayonnement de freinage

Bremsstrahlung. 1. B. entsteht in einer Röntgen-Röhre beim Auftreten der Kathodenstrahlelektronen auf die Antikathode, s. Bremsspektrum.

2. Die Ablenkung eines sehr energiereichen Elektrons im Coulomb-Feld eines Atomkerns bewirkt, daß eine Änderung des elektromagnetischen Feldes in der Umgebung des Elektrons eintritt. Diese Änderung bewirkt die Aussendung einer elektromagnetischen Welle, die vom Ort der Ablenkung ausgeht. Das heißt quantenmäßig: das Elektron emittiert ein Lichtquant oder mehrere Lichtquanten. Sowohl der gesamte Vorgang wie die emittierten Quanten heißen B., da diese Strahlung mit der Abbremsung des Elektrons verbunden ist. Die dem Lichtquant innewohnende Energie muß aus der kinetischen Energie des Elektrons gedeckt werden. Der Energieverlust des Elektrons bei jeder Wechselwirkung dieser Art ist im Mittel die Hälfte seiner jeweiligen Energie. Der Prozeß ist also stark energieverzehrend. Er ist für die Abbremsung von Elektronen praktisch allein verantwortlich, wenn die Elektronen Energien oberhalb 10 MeV haben, wie sie in der kosmischen Strahlung vorkommen. Unter dieser Grenze wird die Abbremsung im wesentlichen durch die Ionisierung der Atome besorgt, die durch Zusammenstöße des Elektrons mit den Hüllenelektronen der Atome zu-

stande kommt. Eine Analogie zum Bremsstrahlungsprozeß weist die *Paarerzeugung auf, bei der ein Lichtquant, vorausgesetzt, daß es wie das Elektron Energien $\gtrsim 10$ MeV hat, ein Elektronenpaar erzeugt. Wiederholte Bremsstrahlungsprozesse und Paarerzeugungen führen zur Ausbildung von *Elektronenkaskaden.
S. a. Strahlungsemission des Plasmas. [7]
engl.: bremsstrahlung
franz.: rayonnement de freinage

Lit.: Heisenberg, Vorträge über Kosmische Strahlung, Springer, Berlin, 2. Aufl., 1953. – Heitler, Quantum Theory of Radiation, Oxford University Press.

Bremssubstanz, s. Moderator.

Bremsverhältnis, Bremsvermögen. Das Bremsvermögen eines Stoffes (Moderators) ist um so größer, je größer der mittlere (logarithmische) Energieverlust ξ des gestreuten Teilchens je Stoß ist und je mehr Stöße auf der Längeneinheit erfolgen. Die Zahl der Stöße auf 1 cm ist

$$\frac{1}{\lambda_s} = \Sigma_s \tag{1}$$

(λ_s Streulänge; $\Sigma_s = N \cdot \sigma_s$ makroskopischer Streuquerschnitt). Der für die Theorie wichtige mittlere logarithmische Energieverlust je Stoß ist

$$\xi = \overline{\ln \frac{E_{i+1}}{E_i}} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \cdot \tag{2}$$

Demzufolge ist definiert

$$\text{Bremsvermögen} = \xi \cdot \Sigma_s \ [\text{cm}^{-1}] \,. \tag{3}$$

Das Bremsvermögen ist ein Maß für die Brauchbarkeit eines Moderators. Allerdings erfaßt diese Definition nicht die mehr oder weniger starke Absorption, die für die Beurteilung eines Moderators wesentlich sein kann. So ist das Bremsvermögen von Wasser bei weitem das beste. Seine Absorption ist aber recht beträchtlich. Um dies zu erfassen, hat man das Bremsverhältnis folgendermaßen definiert:

$$\text{Bremsverhältnis} = \frac{\xi \cdot \Sigma_s}{\Sigma_a} \,.$$

Das Bremsverhältnis ist eine reine Zahl.

Bremsvermögen und Bremsverhältnis der wesentlichen Moderatoren sind in der Tabelle zusammengestellt.

Moderator		Bremskraft	Bremsverhältnis
Wasser	H_2O	1,53 cm^{-1}	72
schweres Wasser	D_2O	0,170	12 000
Helium	He	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$ *	83
Beryllium	Be	0,176	159
Graphit	C	0,064	170

* Bei Atmosphärendruck und 20 °C. [7]

engl.: Bremsvermögen = slowing down power
Bremsverhältnis = moderating ratio

franz.: Bremsvermögen = pouvoir de ralentissement
Bremsverhältnis = rapport de modération

Bremsvermögen von Materie gegenüber α-Strahlen ist jener Faktor, der angibt, um wieviel größer der Geschwindigkeitsverlust der α-Teilchen in einer bestimmten, kleinen Schichtdicke des betreffenden Stoffes als in einer gleichen Schichtdicke Luft von Normaldruck ist. Manchmal wird auch etwas unkorrekt einfach das *Luftäquivalent, die Schichtdicke des Stoffes, welche ebenso stark bremst wie 1 cm Luft, ausgedrückt in mg/cm², als B. bezeichnet, obwohl diese Größe gerade reziprok mit dem eigentlichen B. geht.
Bezieht man das B. noch auf das einzelne Atom des Stoffes bzw. der Luft, so erhält man das a t o m a r e B. relativ zu Luft, das einfach angibt, wieviel mal stärker ein Atom des betreffenden Stoffes bremst als ein „Luftatom".
Streng genommen kann man jede Art von B. nur für eine bestimmte Energie der α-Strahlen angeben. Für α-Strahlen von 6 cm Reichweite beträgt das atomare B. relativ zu Luft für:

Wasserstoff	0,20	Kupfer	2,57
Helium	0,55	Blei	4,43
Aluminium	1,50		[1]

engl.: slowing down power *franz. pouvoir d'arrêt*

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Bremswahrscheinlichkeit oder ***Bremskern,** die Wahrscheinlichkeit $G(E, E')$ dafür, daß ein Neutron der Energie E' durch Streuung an einem Atomkern soviel Energie verliert, daß seine Energie nach dem Stoß unter einer vorgegebenen Energie E liegt (s. Bremsgleichung). [13]
engl.: slowing down probability
franz.: probabilité de ralentissement

Bremszeit ist die Zeitdauer des Bremsprozesses von der Spaltenergie (2 MeV) bis zur thermischen Energie. Dafür berechnet man folgende Zahlen (in s) für die bekanntesten Moderatoren:

	Wasser	schweres Wasser	Beryllium	Graphit
Bremszeit	10^{-5}	$4{,}6 \cdot 10^{-5}$	$6{,}7 \cdot 10^{-5}$	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$
Diffusionszeit	$2{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,15	$4{,}3 \cdot 10^{-3}$	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$

Die B. ist klein gegen die Zeit, die die Neutronen bei thermischer Energie bis zur Absorption diffundieren. Diese sind in die Tabelle vergleichsweise eingetragen. Die Absorption durch Uran ist in der Diffusionszeit nicht berücksichtigt. Diese reduziert die extrem großen Diffusionszeiten in reinem D_2O und Graphit auf ca. 10^{-3} s. B. und Diffusionszeit bestimmen die *Generationsdauer in der Kettenreaktion des Reaktors. S. a. Alterstheorie und Fermi-Alter. [7]
engl.: slowing-down time
franz.: temps de ralentissement

Brennstoff (Kernbrennstoff). In der Reaktortechnologie versteht man darunter den flüssigen oder festen Bestandteil des Reaktors, welcher spaltbare Isotope enthält, in dem also die Kernspaltung vor sich geht. Der Kernbrennstoff kann vorliegen als:

Metall, etwa Uran oder Plutonium.

Legierung von Uran oder Plutonium mit anderen Metallen

Keramik, d. h. als Sinterkörper aus Uranoxyd, Urankarbid u. ä.

*Cermet, etwa UO_2 in Al u. ä.

Lösung, etwa Uranylnitrat in schwerem oder leichtem Wasser, Uran in fl. Wismut u. ä.

Suspension, etwa UO_2 in schwerem oder leichtem Wasser u. ä.

Man wird stets solche Kernbrennstoffe bevorzugen, die die geringsten *Strahlenschäden und die größte Beständigkeit gegenüber dem verwendeten Kühlmittel zeigen und ferner die höchsten Temperaturen zu erreichen gestatten. Aus diesem Grund ist metallisches Uran gegenüber den anderen Brennstoffen durch seine Anisotropie, seine Phasenumwandlung bei 668 °C und seine große Reaktionsfreudigkeit benachteiligt. Eine Verwendung von höherprozentigen Legierungen, Cermets, Lösungen und Suspensionen ist fast ausschließlich auf angereichertes Uran beschränkt, so daß Natururan stets als reines Metall, niederprozentige Legierung oder Keramik angewendet werden muß.

Der Ausdruck B. wird also stets für eine Mischung von Isotopen verwandt, von denen nur ein Teil die Spaltbarkeitseigenschaften hat, z. B. für das in der Natur vorkommende Uran mit dem *spaltbaren Isotop U^{235} und dem nichtspaltbaren U^{238}, gegebenenfalls mit weiteren Beimengungen (Spaltprodukte, Legierungsmaterial, Fremdatome in Verbindung wie UO_2, UC). Bedingung ist, daß die neben den *spaltbaren Kernen vorhandenen sonstigen Kerne nicht verhindern, daß dieser B. unter geeigneten Bedingungen eine Kettenreaktion in Gang hält. Eine Substanz ist sicher dann kein B. eines thermischen Reaktors, wenn die Zahl der von ihm absorbierten thermischen Neutronen größer ist als die Zahl der von den spaltbaren Kernen absorbierten, multipliziert mit der Anzahl der pro Absorption freiwerdenden schnellen Neutronen.

Für den Begriff B. wird synonym das Wort S p a l t - s t o f f gebraucht, wenn man eine Verwechslung mit fossilem B., der bei einem Reaktorkraftwerk gleichfalls – etwa für einen Überhitzer – gebraucht wird, vermeiden will. Das Wort Spaltstoff wird sonst bevorzugt für reine spaltbare Materie, z. B. U^{235} oder Pu^{239}, gebraucht. [7, 20]

engl.: fuel

franz.: combustible (nucléaire)

Brennstoff, abgereicherter, sprachlich widerspruchsvolles Wort für verarmter *Brennstoff. [7]

Brennstoff, angereicherter, enthält mehr als 0,71 % spaltbaren Materials. 0,71 % U-235 enthält das natürlich vorkommende Uran.
A. B. kann man nur auf synthetischem Wege erhalten, indem man aus natürlichem Uran durch physikalische Methoden das spaltbare Uran-235 anreichert oder über einen Konverter- oder Brut-Reaktor andere spaltbare Produkte, wie Plutonium-239 oder Uran-233 gewinnt, diese separiert und sie als Kernbrennstoffe entweder in reinem Zustand verwendet oder sie natürlichem Uran zulegiert. Bei angereichertem B. kann man Stahl als Konstruktions- und Hülsenmaterial verwenden, da man in diesem Fall höhere Neutronenverluste durch Absorption in Kauf nehmen kann. [22]
engl.: enriched fuel
franz.: combustible enrichi

Brennstoff, aufgearbeiteter, s. Kernbrennstoffaufbereitung.
engl.: regenerated fuel
franz.: combustible régénéré

Brennstoffe, fossile, sind im Gegensatz zu Kernbrennstoffen die bis heute konventionellen Energiequellen Kohle und Erdöl einschließlich der daraus gewonnenen Produkte. [7]
engl.: fossile fuel
franz.: combustible fossile

Brennstoff, keramischer. Da Uran, Plutonium und Thorium in ihrer metallischen Form sehr ungünstige metallurgische Eigenschaften haben, benutzt man sie für höhere Beanspruchungen in gesinterter Form. Bekannte Materialien sind:

Urandioxyd UO_2 spez. Gewicht ca. 11 g/cm^3
Urankarbid UC spez. Gewicht ca. 13,6 g/cm^3
Thoriumoxyd ThO_2 spez. Gewicht ca. 10 g/cm^3.

Diese Stoffe sind hochschmelzend ohne die Phasenänderungen des Metalls, lassen sich also bis zu hohen

Temperaturen verwenden. Sie sind zum Teil kubisch, zeigen also nicht die mit der Anisotropie des Uranmetalls zusammenhängenden Strahlenschäden. Gesintertes Uran-IV-Oxyd empfiehlt sich ferner als Kernbrennstoff bei wassergekühlten Reaktoren, weil es gegen Wasser praktisch inert ist. Nachteile der k. B. sind die geringere Dichte, die große Stoßempfindlichkeit sowie die z. T. sehr geringe Wärmeleitfähigkeit. Brennstoffelemente aus gesintertem UO_2 können u. U. im Inneren Temperaturen annehmen, die den Schmelzpunkt der Verbindung bei etwa 2800 °C übersteigen, bei Wärmebelastungen, die unter gleichen Bedingungen in Metalluran eine Zentraltemperatur von nur wenigen hundert Grad ergeben. Über das Verhalten von keramischem Kernbrennstoff im Reaktor ist nur wenig bekannt. Die hohen Wärmespannungen durch die hohen Temperaturgradienten im Inneren sowie die gebildeten Spaltgase haben ein baldiges Zerspringen der Sinterkörper zur Folge.

Die Herstellung dieser Materialien geschieht hauptsächlich durch folgendes Verfahren. Die Komponenten (z. B. Uran und Graphit) werden pulverförmig gemischt, bei sehr hohen Drucken (ca. 2500 at) mehrmals gepreßt und dann im Vakuum oder in Edelgasatmosphäre bei 1100 bis 2000 °C gesintert. [8, 20]

engl.: ceramic fuel

franz.: combustibles céramiques

Brennstoff, natürlicher, ist Uran mit der in der Natur vorkommenden natürlichen Zusammensetzung der Isotope, wobei das spaltbare Uranisotop 235 in einer Konzentration von nur 0,71 % vorhanden ist. [22]

engl.: natural fuel

franz.: combustible naturel

Brennstoff, verarmter, Kernbrennstoff, dessen spaltbare Isotope ganz oder teilweise verbraucht worden sind. V. B. fällt nach der Brennstoffaufbereitung oder nach Abtrennung der spaltbaren Isotope in einer Trennanlage an. [7]

engl.: depleted fuel

franz.: combustible appauvri

Brennstoffaufbereitung. Das im Brennstoff heterogener Reaktoren enthaltene spaltbare Material läßt

sich aus folgenden Gründen nicht vollständig ausnützen:

a) Abnahme der Reaktivität durch Verarmung an Spaltstoff und *Vergiftung durch Spaltprodukte und schwere Isotope.

b) Mechanische Beschädigung der Brennstoffelemente und ihrer Ummantelung durch thermische Beanspruchung sowie Bestrahlung mit Neutronen und Gammastrahlen.

Durch die B. werden diese Veränderungen des Brennstoffs soweit wie möglich rückgängig gemacht. Unter B. versteht man Prozesse, in denen neutronenbestrahlte Kernbrennstoffe von den bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukten befreit werden. Gleichzeitig wird das neu entstandene Plutonium vom Uran sowie das spaltbare Uran-233 vom Thorium und Protaktinium separiert. Die separierten und von Reaktorgiften befreiten Kernbrennstoffe werden wieder zu Brennstoffelementen verarbeitet.

Bei der B. werden im allgemeinen die Isotope gleicher Elemente nicht voneinander getrennt. Das Isotopenverhältnis von Uran und Plutonium wird daher in den wiederaufgearbeiteten Brennstoffelementen anders sein, als in den ursprünglichen (s. Thorium-Zyklus, Plutonium-Zyklus).

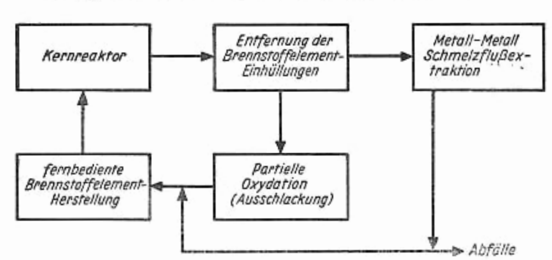
B. für natürliches Uran: *Purex-Prozeß, *Redox-Prozeß, *Chelation-TTA-Prozeß, Pyrometallurgische Prozesse (s. u.), *Chlortrifluorid-Prozeß, *Bromtrifluoridprozeß, *Oxydausschlackung, *Karbidausschlackung, *Extraktionsprozesse Metall-Metall, Flüssig-Flüssig, Fest-Flüssig, *Salzschmelzflußextraktion.

B. für angereichertes Uran: *Prozeß-25-Hexon und *Prozeß-25-TBP.

B. für Thorium: *Thorex-Prozeß, *Interim-23-TBP-Prozeß und *Interim-23-Hexon-Prozeß.

Bei homogenen Reaktoren ist kontinuierliche B. notwendig. Sie gelingt mittels Kationenaustauschern, die man vor Inbetriebnahme mit spaltbarem Uran-233 aufgeladen hat. Ein Teil der wäßrigen Uranylsulfat-Lösung homogener Kernreaktoren, welche aus U-233 besteht und gleichfalls den Kernbrennstoff darstellt, wird in einem Aufbereitungsbeipaß kontinuier-

lich entnommen und nach einer Abklingverweilzeit von ca. fünf Tagen über einen Kationenaustauscher, der mit Uran-233 aufgeladen wurde, geschickt. Ein großer Teil der neutronenabsorbierenden Spaltprodukte wird im Ionenaustauscher von diesem gegen das vorher aufgeladene Uran-233 ausgetauscht, das dem Reaktorprozeß kontinuierlich wieder zugeführt wird. Die Ionenaustauscher-Regenerierabwässer werden einer Aufbereitungsanlage zugeführt. In dieser wird das noch verbliebene Uran-233 von den Spaltprodukten entfernt. Als Ionenaustauscher werden *Dowex 30 oder *Amberlite IR-105 genannt. Gasförmige Spaltprodukte entweichen durch eine Teilentgasung. Viele Spaltprodukte sind bei Reaktoroperationstemperaturen von ca. 275 °C im Wasser so wenig löslich, daß nach einigen Tagen voller Reaktorleistung ihr Löslichkeitsprodukt bereits überschritten wird und sie als unlösliche Sulfate ausfallen und durch *Hydroklone aus der flüssigen Reaktorlösung mechanisch separiert werden können.



Fließschema für die pyrometallurgische Brennstoffaufbereitung

Pyrometallurgische Brennstoffaufbereitung *(engl.: pyrometallurgical process)*. Diese stellt eine neue Art der B. dar. Während die üblichen Methoden die Brennstoffe stets chemisch auflösen und sie in flüssiger, wäßriger Phase aufbereiten, werden die pyrometallurgischen Prozesse bei hohen Temperaturen, ohne vorherige chemische Auflösung der Brennstoffelemente, im metallischen Zustand des Kernbrennstoffes durchgeführt (s. beigegebenes Fließschema). Annähernd 70 bis 90 % aller Spaltprodukte lassen sich durch diese Hochtemperaturverfahren aus

dem Kernbrennstoff entfernen (z. B. durch Hochtemperaturdestillation, Extraktion der Spaltprodukte durch flüssige Metalle oder Salze, partielle Oxydation der Spaltprodukte usw.). Nur für Niob und Molybdän gilt dieses nicht, weil sie mit Uran Legierungen bilden und sich mit Hilfe pyrometallurgischer Verfahren bis jetzt noch nicht trennen lassen. [12, 22]
engl.: reprocessing of nuclear fuel
franz.: régénération du combustible

Brennstoffauffrischung. Zur Aufrechterhaltung des Reaktorbetriebs muß dem Reaktor laufend neuer Brennstoff zugeführt werden, um den Abbrand von Spaltstoff zu kompensieren. Diese als B. bezeichnete Brennstoffmenge – auch Brennstoffzuführung *(engl.: feed)* genannt – braucht nicht unbedingt dieselbe Zusammensetzung wie der ursprünglich vorhandene Brennstoff zu haben; es kann z. B. Natururan zur B. verwendet werden, während anfänglich mit ^{235}U angereicherter Brennstoff benutzt worden ist. [12]
engl.: fuel make-up *franz.: recharge*

Brennstoffausnutzung. Werden in einen Reaktor zu Beginn des Betriebs und später N Atome Spaltstoff eingesetzt (*Brennstoffeinsatz) und werden während der Reaktorbetriebsdauer M Atome gespalten, so nennt man das Verhältnis M/N die B. In M sind außer den gespaltenen Atomen des ursprünglich vorhandenen Spaltstoffs auch diejenigen durch Spaltungen verbrauchten Atome enthalten, welche aus brütbarem Material durch Neutroneneinfang in neuen Spaltstoff umgewandelt worden sind. [12]
engl.: fuel utilization
franz.: coefficient d'utilisation du combustible

Brennstoffauswechslung bezeichnet das Herausnehmen von verbrauchtem Brennstoff aus dem Reaktor und das Laden mit frischem Brennstoff. Bei manchen Reaktorkonstruktionen gehört dazu auch die Aufgabe des Elementaustausches in axialer und radialer Richtung. Diese dient zur Erzielung eines großen mittleren Abbrandes und der Flußabflachung. Es sind zwei Gruppen von *B-A*-Systemen zu unterscheiden:

a) *B-A*-System für Auswechslung auch während des Betriebs,

b) *B-A*-System für Auswechslung nur bei abgeschaltetem Reaktor.

Wünschenswert ist immer ein System a), es ist aber bei einigen Reaktortypen technisch nicht möglich. Auch ist es nicht immer notwendig, nämlich dann, wenn während planmäßiger Stillstandszeiten (z. B. Wochenende) des Reaktors alle notwendigen B.-Arbeiten durchgeführt werden können. Es genügt dann System b).

Typische Vertreter für das System a) sind die fortgeschrittenen gasgekühlten Reaktoren vom Calder Hall-Typ. Typische Vertreter für das System b) sind die z.Z. bestehenden Druck- und Siedewasserreaktoren. Dagegen ist für den von der Siemens-Schuckert-A.G. projektierten Druckwasserreaktor B.A. während des Betriebes vorgesehen.

Eine der wichtigsten Forderungen an die meistens sehr komplizierten Auswechselmaschinen ist ihre Betriebssicherheit. Deshalb sollen für die erforderlichen Arbeitsgänge möglichst einfache und robuste Konstruktionen verwendet werden. [21]

engl.: fuel exchange *franz.: recharge*

Brennstoffeinsatz, die Menge des jeweils im Reaktor befindlichen Brennstoffs, auch Reaktorbeschickung. Vgl. Brennstoffinvestition. [12]

engl.: fuel charge *franz.: charge de combustible*

Brennstoffelement, auch S p a l t s t o f f e l e m e n t.

1. Synonym für *Brennstoff- oder Spaltstoffstab.

2. Eine Zusammenfassung von Brennstoffstäben oder Brennstofflamellen zu einer handlichen Einheit, die als Ganzes eingesetzt ist.

Im Interesse der Wärmeableitung muß der Brennstoff eine große Oberfläche relativ zum Volumen haben. Der einzelne Stab oder die einzelne Lamelle (je nach Konstruktion) haben somit nur eine geringe Festigkeit. Daher faßt man mehrere Schichten oder Stäbe zu einem B. zusammen.

Das Aussehen eines B.s kann sehr unterschiedlich sein und hängt ab von der Art des Reaktors, der Art des verwendeten Brennstoffs, der Natur des Kühlmittels, der Art der Kühlung usw. – S t ä b e (Abb. 1) sind die gegebene Form bei Verwendung von Natururan als Brennstoff. Ihr Durchmesser liegt zwischen 10 und

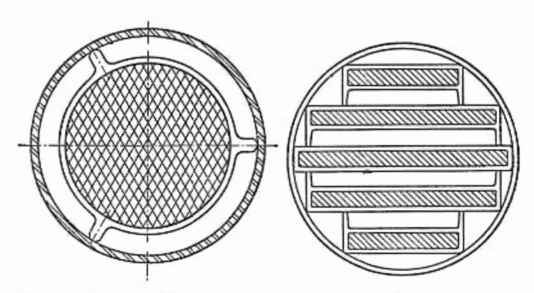


Abb. 1. Beispiel für das B. eines wassergekühlten und -moderierten Reaktors mit Natururan (FR-2, Karlsruhe). Durchmesser des Uranstabes 32 mm, Hülse 1 mm dick. Konzentrisch um den Stab eine Führungshülse für das Kühlwasser. Die Rippen an der Umhüllung dienen der Zentrierung des Uranstabs im Führungsrohr.

Abb. 2. Querschnitt durch ein B. des kanadischen NRU-Reaktors. Kernbrennstoff Natururan, in dicken Platten angeordnet. Um diese Platten die Führungshülse für das Kühlwasser.

36 mm, ihre Länge zwischen 200 und 1000 mm bei gasgekühlten Reaktoren und 3 m bei bestimmten wassergekühlten Typen (NRX). Nachteil der Stäbe sind die im Verhältnis zur Brennstoffmenge kleinen Wärmeübergangsflächen und die hohen Temperaturunterschiede im Inneren (und damit Wärmespannungen), die u. U. zu einer Leistungsbegrenzung des Reaktors führen können, wenn die Zentraltemperatur die α-β-

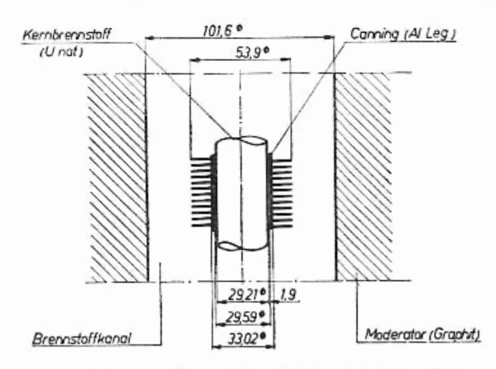


Abb. 3. Brennstoffelement des Kraftwerks Calder Hall

Brennstoffelement

Phasenumwandlungstemperatur von 668 °C erreicht. Eine Aufteilung des Brennstoffs in kleinere Einheiten zum Zwecke der besseren Wärmeabfuhr und zur Senkung der Zentraltemperatur läßt sich bei Natururan nur bis zu einer gewissen Grenze durchführen (Abb. 2), weil durch sie die Menge des Fremdmaterials (Umhüllung, s. u.) im Reaktor vermehrt und außerdem der Resonanzeinfang von Neutronen erhöht wird. Beide Effekte verringern die verfügbare Reaktivität. Um den Wärmeübergang zu verbessern, werden der Hülse Rippen aufgearbeitet, die bei gasgekühlten Reaktoren besonders stark ausgebildet sind (Abb. 3 u. 4).

Rohre: Die bei Stäben auftretende Temperatur- und Spannungsspitze im Zentrum wird bei Rohren beseitigt. Die Herstellung von Rohren ist aber schwierig.

Platten: Eine plattenförmige Anordnung ist für die Wärmeabfuhr am günstigsten. Die dünnen Platten der Swimmingpool und Material-Prüfreaktoren sind aber nur bei Verwendung hochangereicherten Kern-

~ 1000

Abb. 4 Brennstoffelement des Kraftwerks Calder Hall

brennstoffs verwendbar. Bei Natururan lassen sich nur relativ dicke Platten anwenden (Abb. 2).
Abb. 5 zeigt die Außenansicht eines B. vom MTR-Typ (s. u.), Abb. 6 in vergrößertem Maßstab einen Schnitt. Die einzelnen Lamellen müssen eine *Hülse aus Aluminium oder Zirkon haben, um das Austreten radioaktiver Spaltprodukte zu verhindern. Der Zwischenraum wird vom Kühlmittel, das gleichzeitig als Moderator dient, durchströmt.
Die Zahl der Brennstofflamellen kann schwanken. Zum Beispiel sind beim CP-5 zehn Brennstofflamellen zu einem Element zusammengefaßt. Die Dicke einer einzelnen Lamelle beträgt 1,5 mm, davon entfallen 0,5 mm auf eine U-Al-Legierung, die beiderseits mit 0,5 mm Al bedeckt ist. Die Breite der Lamelle ist 7,2 cm, die Länge 60 cm, Querschnitt eines Elements ist 6,1 × 7,4 cm. S. CP-5 und DIDO.


Abb. 5

B. vom MTR-Typ, ein speziell für den MTR entwikkeltes Element, das für die Elemente einer ganzen Reihe von Reaktoren zum Vorbild wurde. Man bezeichnet heute allgemein alle aus einem Behälter mit eingesetzten dünnen Brennstoffplatten bestehenden Elemente als B. vom MTR-Typ. Bei diesem Element wurde versucht, die neutronenökonomischen und die wärmetechnischen Eigenschaften der heterogenen Brennstoffanordnung zu optimalisieren. Das typische MTR-Element besteht entweder aus einer U-AL-Legierung (Urangehalt 14 bis 25 Gewichts-%), oder einer Dispersion von UO_2 in Aluminium (auf pulvermetallurgischem Wege hergestellt). In beiden Fällen wird ein vorgeformtes Stück des Spaltstoffes bei 590 °C zwischen ebensolchen Al-Blechen zu einer Platte von

Brennstoff-element

7,5 × 60 cm dünn (Stärke 0,5 mm Al + 0,5 mm U-Al + 0,5 mm Al) ausgewalzt. Die so gewonnene innige Verbindung zwischen Uran und Aluminium gewähr-

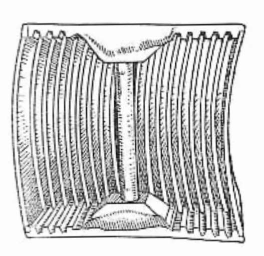


Abb. 6

leistet eine sehr gute Wärmeableitung. Das Uran ist bis zu 93 % angereichert, Verteilung in der Platte 20 bis 30 mg/cm². Maximal 19 solcher Platten, zur Versteifung leicht gekrümmt, werden mit gleichmäßigen Abständen von 3 mm zwischen zwei Al-Halterungen befestigt. Als Distanzstück dient ein Mittelsteg. Länge des aktiven Teils des Elements etwa 60 cm. Das Kühlmedium, gleichzeitig Moderator, wird durch die Zwischenräume hindurchgepumpt. Die so gebildete Verteilung von Spaltstoff und Moderator kann als quasihomogen angesprochen werden.

B e t r i e b s d a t e n eines MTR-Elements mit 19 Spaltstoffplatten bei 40 MW Reaktorleistung (Wärme):

Wärmeleistung pro Element	1,67 MW
mittl. thermischer Neutronenfluß	$5{,}5 \cdot 10^{14}\ n/\text{cm}^2\,\text{s}$
spezifische Leistung	8,9 MW/kg U-235
Leistungsdichte	416 kW/l
Spaltstoffmenge pro Element	188 g U-235
Wärmefluß	127 W/cm² = $1{,}09 \cdot 10^6$ kcal/m²h
Oberflächentemperatur	116 °C
Kühlwasseraustrittstemperatur	46 °C
Abbrand	30 %

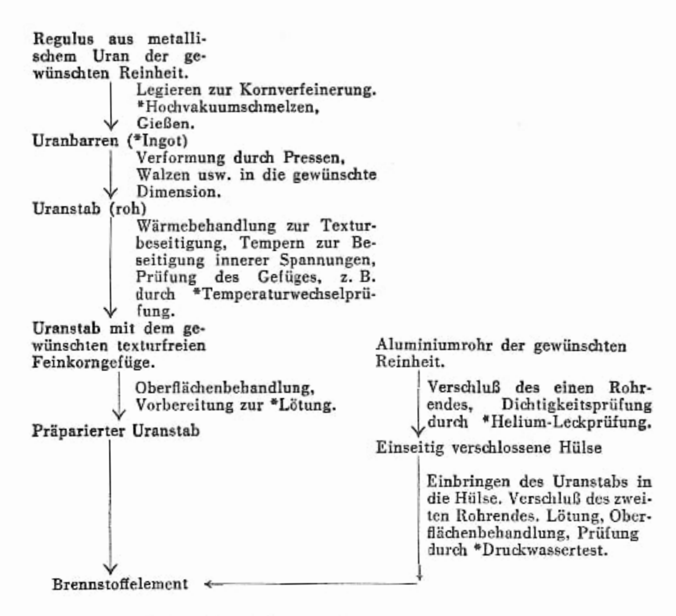
L ö t u n g. Herstellung einer durchgehenden metallischen Verbindung zwischen Kernbrennstoff und Hülse. Eine solche Lötung ist aus mehreren Gründen wünschenswert: 1. Der Spalt zwischen Brennstoff und Ummantelung bei ungelöteten Elementen bedeutet einen Wärmewiderstand, verbunden mit einem Temperatursprung, der sich in gleicher Höhe auch auf die Zentraltemperatur auswirkt, die im Falle von metallischem Uran 668 °C nicht überschreiten darf. Dieser Temperatursprung wird durch die Lötschicht vermieden. – 2. Die Hülse kann sich durch Wärmeausdehnung oder durch plastische Verformung (bei wassergekühlten B.- bei denen die Hülse verhältnismäßig kalt bleibt) vom Brennstoff abheben. Dadurch wird der Wärmewiderstand erhöht und außerdem die Gefahr des **thermal ratcheting* gegeben. Durch eine Lötschicht kann das Abheben vermieden werden. – 3. Im Falle von metallischem Uran und Aluminium als Hülse muß man mit einer Reaktion von Uran mit Aluminium rechnen, die bereits bei etwa 200 °C einsetzt und über die Phasen UAl_2 und UAl_3 zum UAl_4 führt, das ein unzusammenhängendes Pulver darstellt. Durch diese Reaktion wird die Hülse zerstört und der Wärmewiderstand zwischen Brennstoff und Hülse erhöht. Eine Lötschicht verhindert die Bildung dieser Phasen. – 4. Durch eine Lötschicht kann der Korrosionsangriff des Kühlmittels auf den Brennstoff u. U. stark verzögert werden, weil die Lotschicht als zweite Hülse wirkt. – Für die Durchführung der Lötung scheint es mehrere Verfahren zu geben. Bekannt ist hauptsächlich die Lötung mit *Silumin. [7, 20]

engl.: fuel element

franz.: élément de combustible

Lit.: Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. 9, Vereinte Nationen, Genf, 1955.

Brennstoffelement-Herstellung. Die Herstellungsbedingungen für Brenn-Elemente hängen stark von der Form der Brennstoffelemente ab. Das folgende stark vereinfachte Schema gilt für Stäbe aus Uranmetall mit einer Hülse aus Aluminium. [20]



engl.: fabrication of fuel elements
franz.: fabrication d'éléments de combustible

Brennstoffhülse, s. Hülse.

Brennstoffinvestition nennt man die für den Betrieb eines Reaktors insgesamt nötige Brennstoffmenge. Sie umfaßt außer dem Brennstoffeinsatz im Reaktor auch die Bestände in der Aufbereitungsanlage und im Lager, dessen Unterhaltung notwendig ist, um die Auswechslung abgebrannter Elemente durchzuführen. [12]
engl.: fuel inventory
franz.: charge

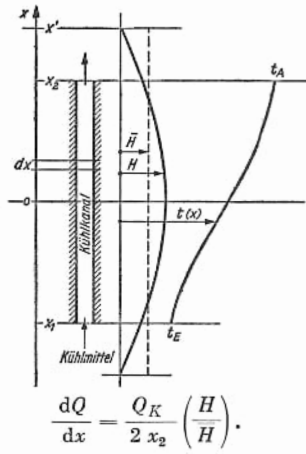
Brennstoffkanal. Wenn bei heterogenen Reaktoren der Moderator nicht gleichzeitig das Kühlmittel ist, muß eine Führung des Kühlmittels um die Brennstoffelemente vorgesehen werden. Diese Einrichtung heißt B. Für die Berechnung der Wärmeabfuhr eines B.s muß die Verteilung der Wärmeentwicklung, welche im einfachsten Fall sinusförmig ist, berücksichtigt werden.

Die Wärmeentwicklung im Kanal errechnet sich aus

Brennstoff-kanal

$$Q_K = \frac{Q_{ges}}{Z}\left(\frac{H/H_{max}}{\overline{H}/H_{max}}\right) = \frac{Q_{ges}}{Z}\left(\frac{H}{\overline{H}}\right),$$

wo Z die Zahl der Kanäle, Q_{ges} [Kcal/h] die gesamte Reaktorwärmeleistung, H [Kcal/m³ h] die örtliche Wärmestromdichte, $\overline{H}$ die mittlere Wärmestromdichte und H_{max} die maximale Wärmestromdichte bedeuten. $\overline{H}/H_{max}$ wird *Formfaktor genannt. Wählt man das Koordinatensystem nach der Abb., so ist die Änderung der längs des Kanals freigewordenen Wärmemenge



$$\frac{dQ}{dx} = \frac{Q_K}{2\,x_2}\left(\frac{H}{\overline{H}}\right).$$

An der Stelle x wird demnach die Wärmemenge

$$Q(x) = \frac{Q_K}{2\,x_2}\int_{x_1}^{x}\left(\frac{H}{\overline{H}}\right)_x dx$$

frei. Der Temperatur- bzw. Enthalpieverlauf $t(x)$ bzw. $i(x)$ des Kühlmittels längs x ergibt sich zu

$$t(x) = t_E + \frac{Q(x)}{G\,c_p}$$

bzw.

$$i(x) = i_E + \frac{Q(x)}{G},$$

wobei t_E, i_E die Eintrittstemperatur- bzw. Enthalpie, G [kg/h] der Durchsatz oder *Durchfluß und c_p [Kcal/kg °C] die spezifische Wärme bei konstantem Druck des Kühlmittels sind. In der Abb. ist $t(x)$ qualitativ dargestellt. Die Verteilung der Wärmestromdichte gehorcht bei einem endlichen zylindrischen Reaktor mit Reflektor (quasi-homogene Spaltstoffverteilung vorausgesetzt) dem Gesetz

$$\frac{H}{\overline{H}} = A \cos \frac{\pi}{2} \frac{x}{x'},$$

wobei x' die Abmessung des nackten Reaktors mit dem gleichen H bedeutet (s. Abb.). [7, 8]

engl.: fuel channels *franz.: canaux à combustible*

Lit.: C. F. Bonilla, Nuclear Engineering, McGraw-Hill, New York, 1957.

Brennstoffkassette, s. Nachtrag.

Brennstofflebensdauer heißt die maximale Einsatzdauer eines Brennstoffelements im Reaktor. Sie kann durch mechanische Beschädigung (z. B. Korrosion), durch Strahlungsbeschädigung des Elements oder auch dadurch begrenzt sein, daß der Reaktor infolge des Spaltstoffabbrands im Brennstoffelement aufhört, kritisch zu sein. Die B. wird nicht in Zeiteinheiten, sondern in MWd/t angegeben, da sie von der Belastung des Brennstoffs (in MW/t Brennstoff gemessen) abhängt.

Bei B r e n n s t o f f e l e m e n t e n aus metallischem Natururan sind heute stets die beiden ersten Effekte lebensdauerbestimmend. Die Ursachen für die Zerstörung liegen insbesondere in der Versprödung (s. Strahlenschäden in Metallen und Uran) und in der Verringerung der Wärmeleitfähigkeit, die an bestimmten Stellen eine Erhitzung in die β-Phase zur Folge haben kann. Durch beide Phänomene kann es zu Spalten und Rissen im Metall kommen, die die Brennstoffhülse zerstören können. Über die erreichbaren Lebensdauern ist nur wenig bekannt; sie dürften stark von der Vorgeschichte des Brenn-Elements und von der Belastung abhängen, der dieses im Reaktor ausgesetzt ist. Bei Natururan scheint ein gesamter Energieentzug von 1000 MWd/t erreichbar. Die häufig angegebene Zahl

von 3000 MWd/t scheint noch nicht genügend durch praktische Erfahrung gestützt zu sein. Zum Vergleich: Eine Tonne natürlichen Urans gestattet einen theoretischen Energieentzug von etwa 7000 MWd, ohne Berücksichtigung des durch Konversion aus U-238 entstandenen Plutoniums. S. a. Brennstoffschäden. [12, 20]

engl.: fuel life time

franz.: vie du combustible

Brennstoffschäden sind zu unterteilen nach solchen, die verursacht werden durch

1. Strahlung,
2. Temperatur und mechanische Beanspruchung,
3. chemische Reaktion des Brennstoffs mit Kühlmitteln und Hülsenmaterial.

Unter den Strahlenschäden ist bei niedrigen Temperaturen das Wachsen des Urans der wichtigste *(growth)*. Es ist am größten für einen Einkristall und bei etwa 200 °C. Über 500 °C spielt es keine Rolle mehr. In einem Polykristall hat das anisotrope Wachsen der Körner eine Aufrauhung der Oberfläche zur Folge *(wrinkling)*. Bei hohen Temperaturen dagegen tritt überwiegend ein Anschwellen und eine Beulenbildung unter Abnahme der Dichte ein *(swelling)*. Diese wird im wesentlichen durch den mit wachsender Temperatur steigenden Gasdruck der eingeschlossenen gasförmigen Spaltprodukte verursacht, und wächst mit dem Abbrand (1 % Abbrand erzeugt in 1 cm^3 Uran 4,73 cm^3 Gas unter Normalbedingungen). Unter den durch Strahlung geänderten physikalischen Eigenschaften ist hier vor allem die Vergrößerung des Kriechens zu nennen, das den letztgenannten Effekt mit bedingt.

Die Temperaturbelastung kann auf Grund folgender Effekte zu Schäden führen:

a) Phasenwechsel des Brennstoffmaterials α-β-γ-Übergang bei Uran),
b) chemische oder Diffusions-Wechselwirkung zwischen Brennstoff- und Hülsenmaterial,
c) mechanische Wechselwirkung Hülse—Brennstoff durch Temperaturwechsel,

d) Wirkungen von Temperaturwechsel auf das Brennstoffmaterial. Hier ist vor allem das Wachsen von Uran durch Temperaturzyklen zu nennen, das im Gegensatz zum Strahlungswachstum bei hohen Temperaturen wichtig ist. Es ist bedingt durch die Anisotropie des plastischen Verhaltens und der thermischen Ausdehnung und deren Temperaturabhängigkeit von Uran, die bei Phasenwechseln und bei auftretenden Texturen im Brennstoffstab zu einem gerichteten Wachstum führt,

e) thermische Spannungen bedingt durch Temperaturgradienten.

Verbiegen von Brennstoffelementen *(bowing)* im Reaktor kann durch innere Spannungen ausgelöst werden. Man beseitigt diese durch Glühen des Urans nach der *Wärmebehandlung. Ein anderer Grund für ein Verbiegen kann in der unsymmetrischen Anhäufung von Spaltprodukten durch einen unsymmetrischen Neutronenfluß im Reaktor bestehen. Vgl. Schwellen. Die Reaktionen des Kühlmittels mit dem Brennstoff haben fast durchweg Volumänderungen und überhitzte Stellen im Brennstoffmaterial zur Folge, was zur fortschreitenden Zerstörung des Hülsenmaterials und damit des Brennstoffelementes führt. S. a. Brennstofflebensdauer. [20, 21]

engl.: fuel damage

franz.: détérioration du combustible

Brennstoffstab, Uranstab, auch Spaltstoffstab, ist ein stabförmiges Gebilde aus spaltbarer Substanz, z. B. Uran, das in einem Reaktor eingesetzt werden kann. Dazu gehört bei metallischen B.n u. a. die Einhüllung aus Aluminium oder Zirkon, damit der Austritt von radioaktiven Zerfallsprodukten vermieden wird. Oft ist ein solcher B. mit Rippen, Lamellen oder ähnlichem ausgerüstet, um den Wärmeübergang ans Kühlmittel zu verbessern und den Kühlmittelstrom zu lenken. Mehrere B.e können zu *Brennstoffelementen zusammengefaßt sein. [7]

engl.: fuel rod, uranium rod

franz.: barre combustible, barre d'uranium

Brennstoffumhüllung hat in erster Linie den Zweck, den Austritt der Spaltprodukte aus dem Brenn-

stoff und damit die radioaktive Verseuchung des Kühlmittels zu verhindern. Da die Spaltprodukte wegen ihrer größeren Ladungszahl eine geringe Eindringtiefe haben, wäre diese Aufgabe relativ leicht zu erfüllen, wenn nicht eine Anzahl weiterer Forderungen an die B. gestellt würden, so unter anderem:

Geringe Neutronenabsorption,
Korrosionsbeständigkeit,
Wärmeleitfähigkeit,
Thermische und mechanische Festigkeit.

Als Materialien für die B. kommen hauptsächlich in Betracht: Al, Mg, Zr, Be, Nb und Edelstahl. Als kurzer Ausdruck wird in neuerer Zeit *Hülse benützt. Der Gebrauch dieses Wortes ist zu empfehlen. [8]

engl.: can, canning, cladding
franz.: gaine du combustible

Brennstoffverbrauch von Leistungsreaktoren. Der Brennstoffverbrauch b eines Reaktors, der die nutzbare Wärmeleistung N_n abgibt, beträgt pro Stunde Betriebszeit:

$$b = \frac{1}{24} \cdot \frac{N_n}{\eta_R \cdot A} \quad \left[\frac{\text{Tonnen}}{\text{Stunde}}\right].$$

A bedeutet dabei den mittleren betrieblichen Abbrand in MWd/t Brennstoff, η_R den Reaktorwirkungsgrad. [21]

engl.: fuel consumption
franz.: consommation de combustible d'un réacteur de puissance

Brennstoffvergiftung. Mit B. bezeichnet man ein vorzeitiges Unbrauchbarwerden von Kernbrennstoffen durch die vergiftende Wirkung neutronenabsorbierender Spaltprodukte, die beim Kernspaltprozeß entstehen. Ein Drittel der gesamten Brennstoffvergiftung wird durch das Spaltprodukt Xenon-135 verursacht, die übrige Vergiftung verteilt sich annähernd folgendermaßen: Seltene Erden ca. 65 %, Caesium und Strontium ca. 10 %, Xenon und Krypton (das Isotop Xenon 135 ist hierbei nicht mitgerechnet) ca. 15 %, Rhodium und Kadmium ca. 10 %.

S. a. Reaktorgifte. [22]

engl.: fuel poisoning
franz.: empoisonnement du combustible

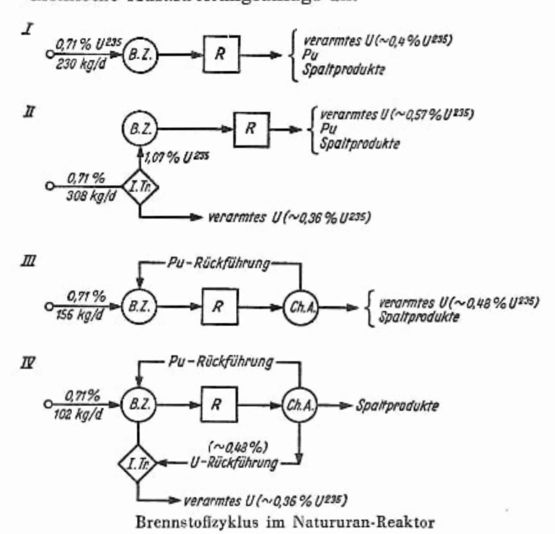
Brennstoffzyklus umfaßt die Vorgänge von der Einführung eines Brennstoffs oder Brutstoffs in den Reaktor bis zur Entnahme, Aufarbeitung des bestrahlten Materials und eventueller Wiedereinführung in den Reaktor. Es sind verschiedene Zyklen zu unterscheiden. Die wichtigsten sind

der B. beim Natururan-Reaktor (s. u.),
der *Plutonium 239-Uran 238-Zyklus,
der *Thorium 232-Uran 233-Zyklus.

Die heutigen Reaktoren arbeiten meist mit Mischungen dieser Zyklen.
Im Natururanzyklus wird Plutonium 239 gebrütet, während die Kettenreaktion im wesentlichen durch Uran 235 aufrechterhalten wird. Im Plutoniumzyklus wird Uran 238 durch Neutroneneinfang zu Plutonium 239 konvertiert, während gleichzeitig ^{239}Pu verbrannt wird. Im Thoriumzyklus wird ^{232}Th zu Uran 233 konvertiert und die Kettenreaktion durch dieses aufrechterhalten. Wegen des Verhältnisses von Spalt- zu Einfangsquerschnitt und der Zahl der entstehenden Neutronen eignet sich der Plutoniumzyklus besser für schnelle Reaktoren, während der Thoriumzyklus seine optimale Ergiebigkeit bei thermischen Reaktoren hat. – S. a. Stoffumsatz im homogenen Reaktor.
B. beim Natururan-Reaktor. Ein mit natürlichem oder leicht angereichertem Uran beschickter Reaktor kann Hauptglied verschiedenartiger Brennstoffkreisläufe sein. In den untenstehenden Abbildungen sind einige Möglichkeiten dargestellt, wobei jedesmal ein thermischer Reaktor *R* mit 1000 MW Wärmeleistung zugrundegelegt wurde. Der Kreis mit *B.Z.* stellt die Anlage für Brennstoffzubereitung dar, der Kreis mit *Ch.A.* eine Anlage zur chemischen Aufarbeitung des verbrauchten Brennstoffs. Das auf der Spitze stehende Quadrat bedeutet eine Isotopentrennanlage *I.Tr.* Das Schema I zeigt den einfachsten Prozeß: dem Reaktor werden täglich 230 kg Natururan zugeführt und eine entsprechende Menge abgereichertes Uran ($\approx 0{,}4\,\%\ U^{235}$) neben Plutonium und Spaltprodukten entzogen. Dieses einfache Schema ist nur bei günstiger Neutronenökonomie (D_2O oder Graphit als Modera-

tor) rentabel. Bei der angegebenen guten Ausnützung des Brennstoffs lohnt u. U. die Aufarbeitung des verbrauchten Brennstoffs nicht mehr. Man kann den Reaktor jedoch auch im Hinblick auf Plutoniumproduktion fahren. In diesem Fall schließt sich rechts eine chemische Aufarbeitungsanlage an.

Brennstoff-zyklus



Brennstoffzyklus im Natururan-Reaktor

Das Schema II zeigt einen Reaktor vom Natrium-Graphit-Typus, der mit leicht angereichertem Uran arbeitet. Die kostspielige Isotopentrennung stellt eine charakteristische Phase in diesem Kreislauf dar. Der Uran-Einsatz erhöht sich gegenüber dem Schema I.

Der Brennstoffkreislauf III ist durch chemische Abtrennung des Plutoniums aus dem verbrauchten Brennstoff und Rückführung in den frisch zugeführten Brennstoff charakterisiert. Dieses Verfahren kommt im Prinzip auf eine schwache Anreicherung des Spaltstoffs hinaus. Der tägliche Einsatz an Natururan ist gegenüber I und II wesentlich verkleinert.

Der Zyklus IV ist im Hinblick auf möglichst geringen Uranverbrauch entworfen. Der verbrauchte Brennstoff wird chemisch aufgearbeitet, das Plutonium rück-

geführt. Das abgereicherte Uran wird ebenfalls rückgeführt und in einer Isotopentrennanlage wieder auf die natürliche Zusammensetzung gebracht. Dieser Zyklus ist jedoch ökonomisch ungünstiger als die obenstehenden. [7, 13]

engl.: fuel cycles

franz.: cycle de combustible

Lit.: M. Benedict and T. H. Pigford, Nuclear Chemical Engineering, McGraw-Hill, 1957.

Brinellhärte, die Härte eines Metalls, ausgedrückt durch den Quotienten aus Belastung und Fläche des Eindrucks (in kg/mm²), den eine gehärtete Stahl- oder Hartmetallkugel nach einer bestimmten Belastungsdauer hinterläßt. Abkürzung H_B oder HB. [4]

engl.: Brinell hardness *franz.: dureté Brinell*

Lit.: DIN 50 351, DIN 50 132.

British thermal unit (Btu). In angelsächsischen Ländern wird als Einheit der Wärmemenge die Btu benützt, und zwar in drei verschiedenen Festlegungen:

$Btu_{60°}$: Wärmemenge zur Erwärmung von 1 lb Wasser von 60 °F auf 61 °F.

$Btu_{39°}$: Wärmemenge zur Erwärmung von 1 lb Wasser von 39,1 °F auf 40,1 °F.

Btu_{mean}: Der 180. Teil der Wärmemenge zur Erwärmung von 1 lb Wasser von 32 °F auf 212 °F.

Außerdem gibt es noch die internationale Tafel-Btu, definiert durch

$$1{,}8\,\frac{Btu_{IT}}{lb} = 1\,\frac{Kcal_{IT}}{kg}\,.$$

Es bestehen folgende Umrechnungsgleichungen:

$$1\ Btu_{60°} = 1054{,}53\ Joule_{abs},$$
$$1\ Btu_{39°} = 1059{,}37\ Joule_{abs},$$
$$1\ Btu_{mean} = 1055{,}79\ Joule_{abs},$$
$$1\ Btu_{IT} = 1055{,}07\ Joule_{abs}.$$ [5]

de Broglie-Beziehung. Die Materiewellenlänge λ hängt mit der Masse m und der Geschwindigkeit v des Materieteilchens zusammen gemäß $\lambda = h/m\,v$ (h Planck sche Konstante). Diese Gleichung gehört zu den Grundformeln der Quantenmechanik und wurde von de Broglie im Jahre 1924 hergeleitet. [7]

engl.: de Broglie relation

franz.: relation de de Broglie

de Broglie-Welle, s. Materiewelle.
engl.: de Broglie wave
franz.: onde de de Broglie, onde associée

Brom 80 und 82, durch Bestrahlung von Brom mit *langsamen Neutronen entstehen die radioaktiven Bromisotope ^{80}Br und ^{82}Br über folgende Reaktionen:

$$^{79}\mathrm{Br}\ (\mathrm{n},\gamma) \begin{cases} ^{80}\mathrm{Br}^* \\ ^{80}\mathrm{Br} \end{cases}$$
$$^{81}\mathrm{Br}\ (\mathrm{n},\gamma)\ \ ^{82}\mathrm{Br}$$

Das angeregte $^{80}Br^*$ geht unter Abgabe von 45 keV Energie mit 4,6 Stunden Halbwertszeit in den Grundzustand über. Diese Energie wird zum größten Teil Konversionselektronen mitgeteilt.
Vom Grundzustand aus zerfällt ^{80}Br mit 18 Minuten Halbwertszeit unter β^--, β^+-, K- und γ-Emission.
Das Isotop Br^{82} ist ein linienreicher Gammastrahler mit einem Beta-Übergang. Die Halbwertszeit beträgt 35,9 Stunden. [16]

engl.: bromine

franz.: brome

Bromtrifluorid-Prozeß (BTP-Prozeß) ist ein Prozeß zur *Auflösung von Urankernbrennstoffen (metallisch, natürliches Uran). Uran löst sich in Bromtrifluorid auf nach der Gleichung:

$$U + 2\,BrF_3 \rightarrow Br_2 + UF_6\,.$$

Wird die Lösung SbF_5 als Fluoridionakzeptor hinzugesetzt, so erhöht sich die Auflösungsgeschwindigkeit der Uranauflösung, das UF_6 selbst beschleunigt ebenfalls autokatalytisch den Auflösungsvorgang. Das entstehende Br_2 wird refluoriert. Während das UF_6 sehr flüchtig ist (siehe Uranfluoride), sind die Fluoride des Plutoniums und einiger Spaltprodukte fest und teilweise schwerlöslich. Sie setzen sich als feste Reaktionsprodukte am Boden der Reaktionsbehälter ab, auf diese Weise gelingt eine partielle Entseuchung des Urans und eine Trennung von Uran und Plutonium.

Einige flüchtige Spaltproduktfluoride können durch fraktionierte Destillation vom UF_6 in mehrstufigen Destillationskolonnen abgetrennt werden. [22]

engl.: BTP process

franz.: procédé au trifluorure de bore

Lit.: H. H. Hyman u. J. J. Katz, The Bromine Trifluoride Process for Metallic Uranium Elements, in: Progress in Nuclear Energy, Series III, Process Chemistry, Pergamom Press, London, 1956. – G. J. Catchers, Fluoride Votality Process for High Alloy Fuels, ORNL 57-4-95. – R. C. Vogel u. R. K. Steunenberg, Fluoride Votality Process for Low Alloy Fuels, in: Symposium on the Reprocessing of Irradiated Fuels, Brüssel, Mai 1957, TID 7534.

Bronze, Bezeichnung für kupferreiche Legierungen, häufig auch speziell für Legierungen des Kupfers mit Zinn.

Zinnbronze: Schon im Altertum bekannt. Maximaler Zinngehalt 20 % (Glockenbronze). Zur Desoxydation setzt man der flüssigen Bronze Phosphor zu und bezeichnet eine derart behandelte Legierung als Phosphorbronze. Neben der Verwendung im Glockenguß und zu Federn und Membranen ist Zinnbronze auf Grund der guten Korrosions- und Verschleißfestigkeit auch als Werkstoff im Apparatebau und für Gleitlager, Verschleißplatten und dgl. geeignet.

Zinnbronzen mit Zusätzen von 2 bis 7 % Zink werden als *Rotguß bezeichnet.

Aluminiumbronzen zeichnen sich durch ihre gute Korrosionsbeständigkeit (z. B. gegen Seewasser) und ihre hohen Festigkeitswerte, welche durch Zusätze von Nickel, Mangan und Silizium noch gesteigert werden können, aus.

Bleibronze ist ein hochwertiges Lagermetall.

Legierungen auf der Basis Kupfer-Mangan und Kupfer-Nickel (unter den geschützten Handelsbezeichnungen Manganin und Konstantan bekannt) finden Verwendung für elektrische Widerstände und Thermoelemente.

Einige Bronzen (z. B. Beryllium-Bronzen und gewisse Aluminium-Mehrstoff-Bronzen) sind aushärtbar und erreichen die Härte des Stahls. [4]

engl.: bronze *franz.: bronze*

Brookhaven National Laboratory. Atomforschungszentrum der amerikanischen Atomenergiekommission

in Upton, Long Island, N.Y., betrieben durch Associated Universities, Inc., Leitung z. Z. Dr. L. J. Haworth. Abk.: BNL. Der Brookhaven-Reaktor ist ein großer Graphitreaktor ähnlich dem Bepo in Harwell und dem *Oak Ridge Reaktor X-10. [24]

Bruchmodul, veralteter Ausdruck für *Biegefestigkeit.

Brüden, s. Verdampfen.
engl.: vapor *franz.: exhaust vapour*

brütbar, s. Brutstoff.

Brüten. Unter B. versteht man die Umwandlung von nicht spaltbarem Material, z. B. ^{238}U, in spaltbare Kerne (^{239}Pu) durch Neutronenanlagerung im Reaktor. Wenn man den Ausdruck im engeren Sinne versteht, muß die Umwandlung in solchem Ausmaß erfolgen, daß die Menge des entstehenden spaltbaren Materials größer ist als die Menge des zur Erzeugung der Neutronen verbrauchten spaltbaren Materials (*Konversionsgrad $C > 1$). In bezug auf die Forderung $C > 1$ ist der Sprachgebrauch nicht einheitlich (s. Brüter). [7]
engl.: breeding
franz.: breeding, surrégénération

Brüter wird z. Z. mit zweierlei Sinn gebraucht.
1. B. heißen diejenigen Reaktoren, die d i e s e l b e spaltbare Substanz erzeugen, wie sie verbrennen. Beispiel: Ein Reaktor wird mit Plutonium ausgelegt und erzeugt beim Betrieb Plutonium aus Uran 238. Die Menge der erzeugten Substanz ist gleichgültig. In diesem Sinne heißen K o n v e r t e r jene Reaktoren, die eine a n d e r e spaltbare Substanz erzeugen, z. B. Erzeugung von Plutonium und Abbrand von Uran 235.
2. B. heißen Reaktoren, die m e h r spaltbare Substanz erzeugen als sie verbrauchen (Umwandlungsfaktor $C > 1$, Brutgewinn $G > 0$). Dabei ist gleichgültig, ob die erzeugte spaltbare Substanz dieselbe ist wie die der primären Auslegung, oder eine andere. Hier wäre ein K o n v e r t e r ein Reaktor, der w e n i g e r spaltbare Substanz erzeugt als er verbraucht ($0 < C \leq 1$). [7]
engl.: breeder *franz.: breeder*

Brutgewinn, Konversionsgrad.
1. K o n v e r s i o n s g r a d ist das Verhältnis von ge-

wonnener spaltbarer Substanz zu der verbrauchten. Wenn η die Zahl der entstehenden schnellen Neutronen für ein in spaltbarer Substanz absorbiertes thermisches Neutron (für ^{235}U ist $\eta = 2{,}08$) ist, so stehen für das Brüten höchstens $\eta - 1$ Neutronen zur Verfügung. Denn ein Neutron wird für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion gebraucht. Der K. ist also maximal $(\eta - 1)/1$. In der Praxis wird diese Zahl beträchtlich reduziert, weil Neutronenverluste durch unerwünschte Absorption und Diffusion durch die Oberfläche nie zu vermeiden sind. Die Ausdrücke Brutverhältnis und Brutfaktor sind nicht eindeutig definiert. Sie geben daher Anlaß zu Mißverständnissen und sollten nicht benützt werden.
engl.: conversion factor, conversion ratio
franz.: facteur de conversion
2. Brutgewinn ist der Überschuß der im Reaktor gewonnenen spaltbaren Substanz über die verbrauchte, bezogen auf die verbrauchte Menge. Daher ist

$$\text{Brutgewinn} = \text{Konversionsgrad} - 1\,.$$

Der B. ist maximal $\eta - 2$. Da η bei allen spaltbaren Substanzen nur sehr wenig über 2 ist, ist der B. durchweg eine kleine Zahl, wenn ein solcher überhaupt existiert. Bei den allermeisten Reaktoren, die mit ^{235}U arbeiten, ist an einen B. nicht gedacht, da die verschiedenartigen Neutronenverluste durch Ausfluß und Absorption in Moderator und Halterungsmaterial wesentlich größer sind als 0,08 Neutron pro Spaltung. [7]
engl.: breeding gain
franz.: gain de breeding, coefficient de surrégénération

Brütreaktor, s. Brüter.

Brutstoff ist ein nichtspaltbarer Stoff, aus dem durch Neutronenabsorption und nachfolgenden spontanen Kernumwandlungsprozessen ein neuer, spaltbarer Stoff entsteht. Die wichtigsten B.e sind Thorium 232 und Uran 238. Sie führen zu den spaltbaren Kernen Uran 233 bzw. Plutonium 239. Thorium ist sehr viel häufiger als Uran und stellt daher einen bedeutenden potentiellen Kernbrennstoff dar. Aus nicht spaltbarem Th-232 entsteht durch Neutronenabsorption und

nachfolgenden β-Zerfällen das spaltbare U-233:

$$^{232}\text{Th}(n, \gamma)\ ^{233}\text{Th} \xrightarrow[23{,}5\ \text{min}]{} {}^{233}\text{Pa} \xrightarrow[27{,}4\ \text{Tage}]{} {}^{233}\text{U}\ (\text{spaltbar}).$$

Entsprechend beim Uran 238:

$$^{238}\text{U}(n, \gamma)\ ^{239}\text{U} \xrightarrow[2{,}3\ \text{d}]{} {}^{239}\text{Np} \xrightarrow[23\ \text{min}]{} {}^{239}\text{Pu}\ (\text{spaltbar}).$$

S. Brennstoffzyklen, Plutoniumzyklus und Thoriumzyklus. [7]
engl.: fertile material
franz.: substance fertile

Bruttoleistung ist die Klemmenleistung der Generatoren eines Kernkraftwerkes. Der Abzug des Eigenbedarfes (Pumpen, Gebläse etc.) ergibt die Nettoleistung. Besonders bei gasgekühlten Reaktoren kann wegen der Gebläse der Eigenbedarf sehr beträchtlich (bis ca. 20 % der B.) sein. [8]
engl.: gross output
franz.: puissance brute

Brutverhältnis, s. Konversionsgrad oder Brutgewinn.

Brutzone, Mantel überwiegend aus Brutstoff außerhalb der Spaltzone zum Zweck des Brütens. Einzelheiten über Zusammensetzung der B. und Einwirkung auf den Reaktor als ganzen s. bei FRED, EBR I und II. [7]
engl.: blanket
franz.: couverture

BSF. Abk. für *Bulk Shielding Facility. [24]

BTP-Prozeß, Abk. für *Bromtrifluoridprozeß.

BTR. Abk. für Belgian Test Reactor, das von der amerikanischen Firma Westinghouse Electric Co. ursprünglich für die belgische Weltausstellung zu liefernde, jetzt im belgischen Forschungszentrum Mol zu bauende Versuchskraftwerk. [24]

Btu und Bthu, *British thermal unit, im englischen gebräuchliche Einheit der Wärmemenge = 252 cal. [6]

BTU, Board of Trade Unit, in England gebräuchliche Einheit der Arbeit = 1 KWh, nicht zu verwechseln mit Btu. [6]

Buckling, s. Flußwölbung.

Bucklingvektor, s. Flußwölbungsvektor.

Bulk Shielding Facility. Kleiner Forschungsreaktor der *AEC in Oak Ridge, Tenn., USA, Prototyp des Wasserbeckenreaktors. In Betrieb seit 17. Dezember 1950. Abk.: BSF. [24]

C

Cadmium ist ein Schwermetall mit der Dichte 8,65; Ordnungszahl 48, Atomgewicht 112; Schmelzpunkt 321 °C, Siedepunkt 765 °C; Kristallstruktur hexagonal dichteste Kugelpackung; chemisches Symbol Cd. Cd ist mechanisch weich und wird daher meistens als Legierung mit Blei verwendet. In der Natur kommen acht stabile Isotope mit den Massenzahlen 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114 und 116 vor. Das kernphysikalische wichtigste ist Cd^{113} (Häufigkeit 12,3 %) wegen der quantitativen Absorption von Neutronen im Bereich von 0 bis 0,5 eV ($\sigma_a > 100$ b). Der thermische Wirkungsquerschnitt dieses Isotops beträgt $19\,500 \cdot 10^{-24}$ cm². Umgerechnet auf das natürliche Isotopengemisch, das man praktisch verwendet, beträgt er immer noch $2400 \cdot 10^{-24}$ cm². Aus diesem Grunde benützt man Cd (neben Bor) im Reaktor als Material für die Regelstäbe. In der experimentellen Kernphysik ist Cd als Material zur Abschirmung der thermischen Neutronen wichtig (s. Cadmium-Verhältnis). – Man gewinnt Cd als Nebenprodukt bei der Aufarbeitung von Zinkerzen, in denen es in geringen Mengen vorkommt. Ein Cd-haltiges Mineral ist das sehr seltene Greenockite. [4, 7]
engl.: cadmium
franz.: cadmium

Cadmium-Grenze. Mit C.-G. ist derjenige Energiewert gemeint, der die starke Neutronenabsorption des Cadmiums nach oben begrenzt. Der Zahlwert liegt bei 0,49 eV, wo σ_{total} nur noch $100 \cdot 10^{-24}$ cm² beträgt. [7]
engl.: cadmium limit
franz.: limite de cadmium

Cadmiumisotope. Durch Bestrahlung von Cadmium mit langsamen Neutronen entstehen eine ganze Reihe

von radioaktiven Isotopen. C. finden als *Leitisotope und in der *Radiochemie Verwendung. [16]

rad. Isotop	Halbwertszeit	Strahlung
^{107}Cd	6,7 Stunden	K, γ, β^+
^{109}Cd	470 Tage	K
^{111}Cd	49 Minuten	γ, e
^{115}Cd (angeregt)	43 Tage	β, γ
^{115}Cd (Grundz.)	2,3 Tage	β, γ
^{117}Cd	2,9 Stunden	β
^{117}In	1,9 Stunden	β

engl.: cadmium isotopes
franz.: isotopes de cadmium

Cadmium-Verhältnis. Wenn man eine Substanz mit Neutronen irgendeines Energiespektrums genügend lange bestrahlt, so ergibt sich die Sättigungsaktivität. Bedeckt man dieselbe Probe mit einem dünnen Cadmium-Blech, so gelangen von den insgesamt auftreffenden Neutronen nur die mit einer Energie oberhalb der Cd-Resonanzstellen (Cadmium-Grenze) auf die bestrahlte Substanz. Die Sättigungsaktivität A_{Cd} der Substanz Z wird daher im allgemeinen eine andere sein. Das Cd-Verhältnis A/A_{Cd} gibt bei bekanntem Fluß ein Maß für die Aktivierbarkeit von Z durch *C-Neutronen oder – bei bekannter Aktivierbarkeit – das Verhältnis des totalen Neutronenflusses zu dem Neutronenfluß oberhalb der Cd-Grenze. Zum Beispiel bedeutet großes Cd-Verhältnis an einer Stelle im Reaktor, daß dort der Anteil der thermischen Neutronen (genauer der C-Neutronen) am Gesamtfluß groß ist. Bei festgehaltenem Neutronenspektrum hängt das Cd-Verhältnis von der Substanz Z, und zwar speziell vom Gang des Aktivierungsquerschnitts mit der Energie ab. [7]
engl.: cadmium ratio
franz.: rapport de cadmium, rapport cadmique

Calciothermie, bei der *Uranherstellung angewandte Methode der Reduktion von Uranverbindun-

gen (meist von Uran-IV-Fluorid) mit metallischem Calcium zum Uranmetall:

$$UF_4 + 2\,Ca \rightarrow U + 2\,CaF_2\,.$$

Die Reaktion ist stark exotherm. Bei genügend großen Chargen fallen deshalb U-Metall und Schlacke (CaF_2) geschmolzen an und lassen sich so leicht trennen. Ähnliches gilt für die verbreitetere Reduktion von Uran-IV-Fluorid mit Magnesium. Ausführung der Reduktion in mit CaF_2 ausgekleideten Behältern. [20]
engl.: calciothermic reduction
franz.: réduction calciothermique

Calcium (Ca), Erdalkalimetall der Dichte 1,55 g/cm³. Ordnungszahl 20, Atomgewicht 40,08, Schmelzpunkt 850 °C, Siedepunkt 1435 °C. Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen 0,43 barn/Atom. Kristallstruktur: Unterhalb 450 °C kub. flz., zwischen 450 °C und dem Schmelzpunkt hex. dichtest. Kugelpackung. Calcium besitzt Bedeutung in der Reaktortechnik als Reduktionsmittel bei der Herstellung von Uranmetall (*Calciothermie). Für diesen Zweck muß das Metall *nuklearrein vorliegen. [20]
engl.: calcium *franz.: calcium*

Calder Hall, erstes britisches Atomkraftwerk am Fluß Calder bei Sellafield in Cumberland. Gesamtes Werk (Fertigstellung bis 1958) besteht aus zwei Teilen, Calder Hall A und B, mit je zwei gasgekühlten (CO_2), graphit-moderierten Reaktoren mit natürlichem Uran, je einer gemeinsamen Turbinenhalle mit vier 23-MW-Turbogeneratoren und je zwei Kühltürmen. Dampferzeugung in je vier Wärmeaustauschern pro Reaktor. Wärmeleistung je Reaktor ca. 200 MW, elektrische Leistung ca. 42 MW (davon ca. 20 % für Eigenverbrauch der Anlage). Installierte Kapazität des gesamten Werkes (4 Reaktoren) 184 MW. Primär für Plutoniumerzeugung und nur sekundär für Elektrizitätsgewinnung.
Für die britische Atomenergiebehörde gebaut unter Leitung der Industrial Group der Behörde. Baubeginn August 1953. Erster Reaktor des Werkes A kritisch am 22. Mai 1956. Am 17. Oktober 1956 als erstes großes Atomkraftwerk der Welt offiziell durch die britische

Königin an das öffentliche Elektrizitätsnetz angeschlossen. Im Abstand von einem bzw. einem halben Jahr sollen die zwei Calder-B-Reaktoren folgen. [24]

Calder-Hall-Reaktoren

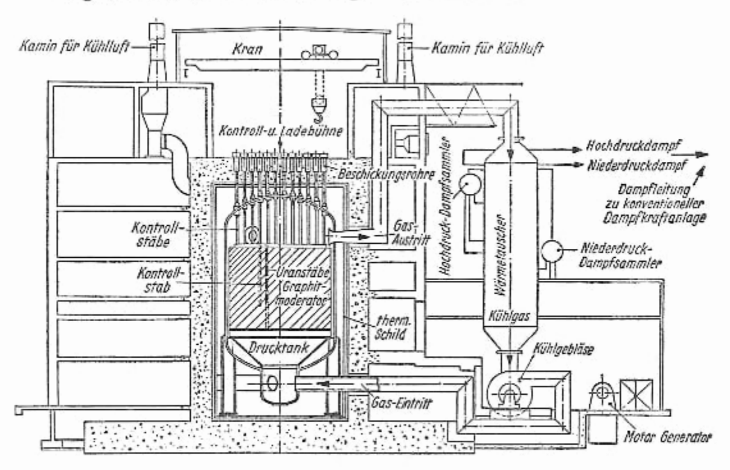
Calder-Hall-Reaktoren vom Typ A und B sind graphitmoderierte, gasgekühlte, thermische, heterogene Reaktoren mit natürlichem Uran als Brennstoff, die außer zur Energieerzeugung (hauptsächlich) zur Pu-Gewinnung gebaut worden sind. Die Vorteile dieses Reaktortyps sind:

1. klassischer Reaktortyp, der heute kerntechnisch gut beherrscht wird, Hauptprobleme sind nur noch technisch-konstruktiver Art, (voluminöse Anlageteile, Bearbeitungs- und Transportprobleme),
2. Verwendung natürlichen Urans,
3. große räumliche Gestalt ergibt gute Neutronenökonomie.

Dem stehen als Nachteile gegenüber:

1. große Uran- und Graphitmengen erforderlich,
2. geringe spezifische Leistung,
3. begrenzte Kühlgasdrucke,
4. hoher Energieeigenverbrauch,
5. sehr hohe Anlagekosten.

Zur Energieerzeugung allein wäre der Reaktor wohl nie gebaut worden. Die Abb. zeigt das Schema der An-



lage. Im Reaktordruckkessel (Volumen 1062 m³, Zylinderhöhe 21,8 m, -durchmesser 11,3 m, Wandstärke 5 cm) ruhen Moderator und Reflektor aus Graphit in Gestalt eines 24eckigen Prismas von 11 m Durchmesser und 8,25 m Höhe (Gesamtgewicht Graphit 1170 t) auf 10 cm dicken Stahlplatten. Im Gegensatz zu anderen Graphitreaktoren sind die Brennstoffelemente hier vertikal angeordnet. Als *Brennstoffelement dient ein Uranstab (Länge 102 cm, Durchmesser 2,9 cm) in einem Mg-Al-Rippenrohr. Die eingängige Kühlrippe ist aus dem Vollmaterial herausgedreht. Sechs solcher Elemente sind in einem Kühlkanal übereinander angeordnet. Gesamtzahl der Kühlkanäle 1696, Gesamtgewicht des Uran 120 t. Das CO_2-Kühlgas durchströmt die Kanäle von unten nach oben (Gesamtmenge CO_2 in Reaktor und Kühlsystem 20 t). Dabei wird es von 140 °C auf 336 °C erwärmt. Druck 7 at, Durchflußmenge 3500 t/h. In vier Wärmetauschern (pro Reaktor) erfolgt die Dampferzeugung, zur Verbesserung des Wirkungsgrades zweierlei Dampfarten, Hochdruckdampf von 313 °C unter 14,7 at sowie Niederdruckdampf von 171 °C unter 4,4 at. Von den Wärmetauschern aus wird das Kühlgas durch große Gebläse, Gesamtleistung etwa 12 MW, d. h. rund 25 % der erzielten elektrischen Leistung, wieder in den Reaktor zurückgepreßt. [25]

Lit.: C. Hinton, Progr. in Nuclear Energy, Ser. II, Vol. 1, S. 381, Pergamon Press, London, 1956. – C. Hinton, Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 3, S. 322, Genf, 1955. – Sonderheft Nuclear Engineering, Vol. 1, Heft 6, 1956.

Californium, s. Kalifornium.

Calutron. Eine magnetische Trennanlage für Isotope nach dem Prinzip des Massenspektrographen, die 1941 von L a w r e n c e durch Umbau eines Zyklotrons (daher der Name, zusammengezogen aus California University Cyclotron) zur Abtrennung von Uran 235 aus dem natürlichen Uran konstruiert wurde. Zunächst konnte damit pro Stunde 1/1000 mg reines Uran 235 gewonnen werden. In den darauffolgenden Jahren wurde die Abtrennung in den Clinton Engineer Works in Oak Ridge, USA, mittels zahlreicher C.e im großen betrieben. [1]

engl.: calutron *franz.: calutron*

Capenhurst. Standort der britischen *Gasdiffusions-Isotopenanlage in Cheshire zur Gewinnung von Uran-235. [24]

Carbitol (Dibutylcarbitol), amerikanische Abk. für das Extraktionsmittel Dibutyläther des Äthylenglycols. Es wird ohne Verdünnungsmittel zur Trennung von Uran und Plutonium von den Spaltprodukten aus einer wäßrigen Lösung verwendet (Salzzuschlag: HNO_3). [22]

Carlsonsche Methode, ein Verfahren zur näherungsweisen Lösung der *Boltzmann-Gleichung. Die C. M. ist der *Gruppen-Diffusionsmethode analog, indem sie außer den Neutronenenergien auch die Flugrichtungen in Gruppen einteilt. Um die C. M. anzuwenden, hat man zunächst eine Zerlegung der (energieabhängigen) Boltzmann-Gleichung nach Energiegruppen vorzunehmen. Dazu integriert man sie der Reihe nach über die einzelnen Energiegruppen und erhält ein System von gekoppelten Integro-Differentialgleichungen. Bei Kugelsymmetrie ergibt sich auf diese Weise z. B.

$$\left[\mu \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1-\mu^2}{r} \frac{\partial}{\partial \mu} + (\Sigma_{si} + \Sigma_{ai})\right] \Phi_i = \sum_k [S_{ik} + F_i \nu \Sigma_{fk}] \bar{\Phi}_k$$

$$\text{mit } \bar{\Phi}_k = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} \Phi_k(r, \mu)\, d\mu .$$

Dabei bedeutet $\Phi_i = \Phi_i(r, \mu)$ den mittleren Fluß der i-ten Energiegruppe und μ den cos des Richtungswinkels. Die Indizes bei den *Wirkungsquerschnitten (s Streuung, a Absorption, f Spaltung) deuten darauf hin, daß es sich um Mittelwerte über der betreffenden Energiegruppe handelt. S_{ik} ist der Streuquerschnitt für den Übergang aus der k-ten in die i-te Gruppe, F_i jener Anteil der Spaltneutronen, der auf die i-te Gruppe entfällt. Die C. M. setzt an diesen Gruppengleichungen an, indem der Bereich

$$-1 \leqq \mu \leqq +1$$

in N gleichgroße Unterbereiche zerlegt wird. Innerhalb dieser Bereiche wird linear interpoliert:

$$\Phi_i(r, \mu) = \frac{\mu - \mu_{n-1}}{\mu_n - \mu_{n-1}} \cdot \Phi_i(r, \mu_n) + \\ + \frac{\mu_n - \mu}{\mu_n - \mu_{n-1}} \cdot \Phi_i(r, \mu_{n-1}).$$

Nun wird jede der obenstehenden Gruppengleichungen über die einzelnen Intervalle $\mu_{n-1} \ldots \mu_n$ integriert. Es ergibt sich dabei jedesmal eine lineare Differentialgleichung für die Funktionen $\Phi_i(r, \mu_k)$, die nur mehr von r abhängen. Damit ist der Übergang von der partiellen Boltzmann-Gleichung zu einem System von N gewöhnlichen Differentialgleichungen vollzogen, das mit den üblichen Methoden (zweckmäßig mit Hilfe einer elektronischen Rechenmaschine) gelöst werden kann.

Die mit der C. M. erreichte Approximation hängt von der Zahl N der Richtungsgruppen ab. Bereits mit vier Gruppen (S_4-Methode) kann eine merkliche Verbesserung gegenüber der Diffusionstheorie erreicht werden. [13]

engl.: Carlson's S_n-method

franz.: méthode de Carlson

Lit.: J. Codd, L. R. Shepherd and J. H. Tait, The Physics of Fast Reactors, in Progress in Nuclear Energy, Bd. 1, Pergamon Press, 1956.

Carnotit. Wichtiges, in Colorado vorkommendes Uranmineral von der Zusammensetzung:

$$KUO_2(VO_4) \cdot 1^1/_2\, H_2O.$$

(Urangehalt etwa 23 %, Vanadiumgehalt 20 %. [3]

engl.: carnotite

franz.: carnotite

Cäsium 131, 134 und 137 werden in der Isotopentechnik angewandt.

^{131}Cs, ein reiner K-Strahler mit 10 Tagen Halbwertszeit, der durch Bestrahlung von Barium durch langsame Neutronen entsteht. Als Alkalimetall kann das erzeugte ^{131}Cs leicht aus dem Barium herausgelöst werden.

^{134}Cs. Durch Neutronenbestrahlung von ^{133}Cs entsteht über einen (n, γ)-Prozeß ^{134}Cs sowohl im Grundzustand als auch in einer angeregten Energiestufe.

Strahlungsdaten:

Isotop:	^{134}Cs (angeregt)	^{134}Cs (Grundzust.)
Halbwertszeit:	3,15 Stunden	2,3 Jahre
β-Strahlung:	—	0,08 . . . 0,7 MeV
γ-Strahlung:	0,01 . . . 0,14 MeV	—
K-Strahlung:	ca. 90 %	—

Cs^{137}. Wegen seiner großen Halbwertszeit und günstigen Beta- und Gammastrahlungsenergie wird dieses Isotop häufig für Bestrahlungsvorrichtungen benutzt. Man verwendet es auch bei der *Radiographie und zur Dickenmessung.

Strahlungsdaten:

Halbwertszeit:	30 Jahre	
β-Strahlung:	0,52 MeV	92 %
	1,17 MeV	8 %
γ-Strahlung:	0,66 MeV	82 %
Konversionselektronen:		10 %

[16]

engl.: caesium *franz.: caesium*

Cassiopeium (Cp). Von Auer von Welsbach vorgeschlagener Name für das *Lanthaniden-Element der Ordnungszahl 71. Nach internationalem Übereinkommen ist jedoch der Nomenklaturvorschlag von G. Urbain: *Lutetium (Lu) gültig. [3]

engl.: (cassiopeium) lutetium
franz.: (cassiopeium) lutétium

CEA, 1. Abk. für **Commissariat à l'Ênergie Atomique* für die französische staatliche Atomenergiebehörde, 2. Abk. für *Central Electricity Authority*, die staatliche britische Elektrizitätsbehörde, Trägerin des umfangreichen britischen Zehnjahresprogramms (1955 bis 1965) zur Errichtung von Atomkraftwerken. [24]

C.E.A.N. Abk. für Centre d'Etudes pour les Applications de l'Energie Nucléaire, 1952 von Staat, Hochschulen und Industrie gemeinsam gegründetes belgisches Forschungszentrum für angewandte Atomforschung bei Mol, Provinz Antwerpen. Anfang 1958 wurde der Name anläßlich einer Umorganisation geändert in C.E.N. *(Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire).* [24]

Cellosolve, amerikanische Markenbezeichnung für das Extraktionsmittel Ethylenglycol-monobutyläther. Es wird zur Extraktion und Trennung des Urans von den Spaltprodukten ohne Verdünnungsmittel benutzt

(Salzzuschlag in der wäßrigen Phase: Aluminiumnitrat). [22]

C.E.N., s. C.E.A.N.

CENS. Abk. für das franz. Atomforschungszentrum *Saclay, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay. [24]

Cent = $^1/_{100}$ Dollar. 1 Dollar bezeichnet die Reaktivität eines Reaktors, die den verzögerten Neutronen zukommt. Da der Bruchteil der verzögerten Neutronen beim ^{235}U 0,0076, nach neueren Messungen 0,0064 ist, ist bei einem U-235-Reaktor eine Reaktivität von 0,0076, bzw. 0,0064 = 1 $. 1 Cent ist gleich einer Reaktivität von 7,6 bzw. $6{,}4 \cdot 10^{-5}$. Bei einem Reaktor, der ganz oder teilweise andere Spaltstoffe, z. B. Pu, benutzt, entspricht 1 Cent einer anderen Reaktivität. [7]
Lit.: G. R. Keepin, T. F. Winett u. R. K. Zeigler, Delayed Neutrons from Fissionable Isotopes of Uranium, Plutonium and Thorium, Physic. Rev. 107, 1044 (1957).

Cerencov-Strahlung. Wenn ein sehr energiereiches Elektron, das nahezu mit Vakuum-Lichtgeschwindigkeit fliegt, durch Materie dringt, so erzeugt es eine Wellenstrahlung (Lichtstrahlung), die sich nicht in Form einer Kugelwelle ausbreiten kann, wenn die Phasengeschwindigkeit des Lichts in dem betreffenden Stoff im Verhältnis des Brechungsindex kleiner ist als die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit und damit kleiner als die Geschwindigkeit des lichterzeugenden Elektrons. Es liegen dann ganz ähnliche Verhältnisse vor wie bei der Kopfwelle eines mit Überschallgeschwindigkeit fliegenden Geschosses; wie in diesem Fall entsteht eine Strahlung mit kegelförmiger Wellenfront (Spitze stets am Ort des Elektrons), die man nach ihrem Entdecker C. nennt. Die Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle bildet mit der Flugrichtung der Elektronen einen Winkel, dessen Cosinus durch das Verhältnis der Phasengeschwindigkeit des Lichts in dem betreffenden Stoff zur Elektronengeschwindigkeit gegeben ist. Die C. dient neuerdings, mit Photozelle und Elektronenvervielfacher registriert, im sog. C e r e n c o v - Zähler zur Zählung sehr energiereicher Elektronen. Auch bei Positronen und sogar bei sehr energiereichen Protonen konnte eine C. beobachtet werden. [1]
engl.: Cerenkov radiation
franz.: rayonnement de Cerenkov

Cerencov-Zähler, ein Zählgerät für sehr energiereiche atomare Teilchen, das die Registrierung der von jedem Teilchen in einer geeigneten Substanz erregten *Cerencov-Strahlung mittels Photozelle und Elektronenvervielfacher zur Zählung benützt. [1]
engl.: Cerenkov counter
franz.: compteur de Cerenkov

Cermet. Ein Verbundwerkstoff aus Metall und keramischen Substanzen (z. B. Oxyde, Boride), der pulvermetallurgisch hergestellt wird. C.s vereinigen hohe Temperaturbeständigkeit mit einer im Vergleich mit rein keramischen Werkstoffen erhöhten Wärmeleitfähigkeit und befriedigenden Festigkeitseigenschaften. [4]
engl.: cermet *franz.: cermet*
Lit.: R. Kieffer u. P. Schwartzkopf, Hartstoffe und Hartmetalle, Springer, Wien, 1953. – OEEC Technical Assistance Mission Nr. 191, Powder Metallurgy, OEEC, Paris, 1955.

CERN. Abk. für die Europäische *Organisation für kernphysikalische Forschung, Genf (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). [24]

Chalk River. Bezeichnung des am gleichnamigen Fluß und am Ottawa River gelegenen kanadischen Atomforschungs- und Reaktorzentrums der staatlichen Atomic Energy of Canada Ltd. in der Provinz Ontario, Kanada. [24]

Chapel Cross. Standort des zweiten Atomkraftwerks (kombiniert für Plutoniumerzeugung und Stromlieferung) der britischen Atomenergiebehörde (AEA) in Bau bei Annan, Dumfriesshire. Schwesterwerk von *Calder Hall. Vier gasgekühlte, graphit-moderierte Reaktoren mit natürlichem Uran. Gesamte installierte Kapazität 184 MW, elektrische Nutzleistung 150 MW. [24]

Chargenbetrieb, Betrieb eines Kernreaktors mit einer Brennstoffausstattung (Charge) bis zur Erschöpfung des Brennstoffs. Danach wird der Reaktor entleert und mit einer neuen Füllung versehen. Während des Betriebes erfolgt weder eine Zuführung noch ein Entzug von Spalt- oder Brutstoffen. Auch ein Platzwechsel der Brennstoffelemente (Umsetzen) ist nicht vorgesehen. Der C. stellt die einfachste und technisch am leichtesten zu bewältigende Betriebsart eines Reaktors dar, da während des Betriebs kein Zugang zur Spaltzone und kein Eingriff in die Anordnung er-

forderlich ist, wie beim kontinuierlichen *Reaktorbetrieb.

Der Nachteil des C.s liegt in der geringeren *Reaktivitäts-Lebensdauer des Brennstoffs. Nach der Erschöpfung der Charge haben zwar alle Brennstoffelemente die gleiche Zeit im Reaktor gestanden, doch ist ihre Bestrahlung (Flußzeit) wegen des räumlich i. a. nicht konstanten Flusses verschieden hoch. Ausschlaggebend für die Reaktivitäts-Lebensdauer sind die an der Stelle des stärksten Flusses stehenden Elemente. Die weiter außen stehenden weisen einen geringeren Abbrand auf. Dazu kommt noch, daß der Reaktor an der Stelle des größten Flusses gleichzeitig die größte Reaktivitäts-Empfindlichkeit aufweist.

Ein weiterer Nachteil des C. besteht in seinem hohen Anfangs-Bedarf an *Überschuß-Reaktivität. Während des Betriebes ist daher zunächst eine wirksame Absorptionssteuerung erforderlich, die sich ungünstig auf die Neutronenökonomie auswirkt.

Eine wesentliche Verbesserung kann man beim C. durch Umsetzen der Brennstoffelemente erreichen, indem fortlaufend die stärker abgebrannten, im Zentrum stehenden Stäbe mit außen stehenden vertauscht werden, so daß womöglich alle Stäbe den gleichen Abbrand aufweisen. Beim homogenen Reaktor mit flüssigem Brennstoff stellt sich dieser günstige Effekt von selbst ein, da Wärmeströmungen usw. für Durchmischung sorgen. Durch „Homogenisierung“ des Abbrandes kann dessen Auswirkung auf die Reaktivität halbiert werden. [13]

engl.: batch process

franz.: procédé (par charges) discontinu(s)

Charpysche Pendelschlagprobe. Ein Werkstoffprüfverfahren zur Bestimmung der Kerbschlagzähigkeit im Kerbschlagbiegeversuch und der Schlagbiegezähigkeit im Schlagbiegeversuch. Die gekerbte oder ungekerbte stabförmige Probe liegt an beiden Enden frei auf und wird von einem fallenden Pendelhammer durchgeschlagen. Aus der Differenz zwischen Fallhöhe des Pendelhammers und Steighöhe nach dem Schlag erhält man die Schlagarbeit (in mkg/cm^2) bezogen auf den Probenquerschnitt (beim Kerb-

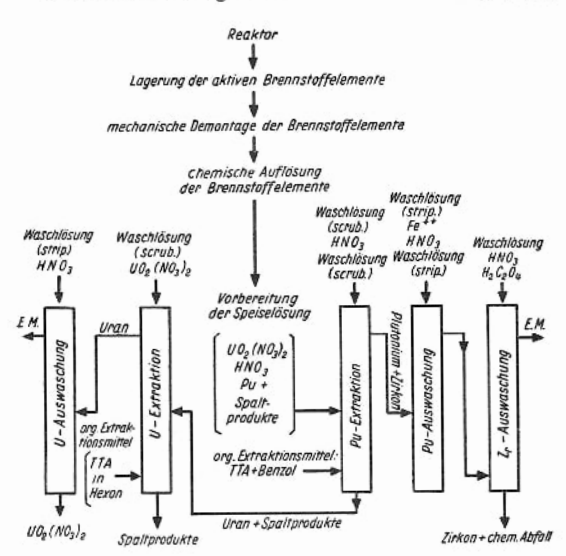
schlagbiegeversuch auf den Querschnitt am Kerb), welche als Kerbschlagzähigkeit bzw. als Schlagbiegezähigkeit angegeben wird. Ein ähnliches Prüfverfahren ist die *Izod-Kerbschlagprobe. [4]
engl.: Charpy test
franz.: essai au mouton-pendule Charpy

Chatillon. Atomforschungszentrum des französischen Atomenergiekommissariats bei Fontenay-aux-Roses (Seine). Standort des ersten französischen Atomreaktors (*ZOE). Befaßt sich insbesondere mit Isotopenerzeugung und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Uran- und Plutoniumverarbeitung. Heißt jetzt offiziell Fontenay-aux-Roses. [24]

Chelatbildung, Bildung einer Wasserstoffbrücke zwischen dem Sauerstoff einer Hydroxyl- und dem einer Carbonylgruppe. Die C. beruht darauf, daß das H-Atom des Hydroxyls gleichzeitig auch in das Elektronensystem des Carbonylsauerstoffs eintritt, indem es sich an ein einsames Elektronenpaar anlagert. Die Stärke der C. hängt von der Konstitution des Stoffes ab; sie übt insbesondere auf die physikalischen Eigenschaften der Verbindungen (Löslichkeit, Absorptionsspektren usw.) einen großen Einfluß aus und kann selbst auf deren chemisches Verhalten (z. B. Substitutionsvorgänge) einwirken. Chelatbildner (z. B. Ca-EDTA, Zirkoniumcitrat etc.) fördern die Ausscheidung von inkorporierten radioaktiven Stoffen aus dem Körper. [28]
engl.: chelating action   *franz.: chélation*

Chelation-TTA-Prozeß, amerikanische Bezeichnung für einen Separationsprozeß des Urans und Plutoniums von den Spaltprodukten mittels Extraktion durch Thenoyltrifluorazeton, verdünnt in Benzol, aus wäßriger Lösung. Das Fließschema des Prozesses ist der Abb. zu entnehmen. Im Gegensatz zum *Purex- und *Thorex-Extraktionsprozeß wird beim Ch.-TTA-P. lediglich das vierwertige Plutonium gemeinsam mit dem Spalt- oder Legierungsprodukt Zirkon extrahiert, während das Uran gemeinsam mit den übrigen Spaltprodukten in der wäßrigen Phase verbleibt. In der ersten Extraktionsstufe kommt es also nur zu einer Trennung zwischen Plutonium + Zirkon in der orga-

nischen TTA + Benzol-Phase und Uran + Spaltprodukte in der wäßrigen Phase. Das Plutonium der ersten



Stufe wird mittels Salpetersäure in Gegenwart eines Reduktionsmittels, das das vierwertige, extrahierbare Plutonium in die nicht extrahierbare dreiwertige Valenzform überführt, aus der organischen Extraktionsphase ausgewaschen, das Zirkon verbleibt weiterhin in der TTA + Benzol-Phase. Das Uran der ersten Stufe wird mittels TTA + Hexon aus der wäßrigen Phase extrahiert und von den Spaltprodukten getrennt, die in der wäßrigen Phase verbleiben. – Das Wort Ch. bedeutet svw. Scherenbindung, Verzahnung, Verknüpfung, Verzweigung. Die Verzweigungsverbindungen nennt man C h e l a t e. Man sagt daher, daß die Extraktion mittels TTA durch Bildung von Chelaten erfolgt. [22]
Lit.: s. Hexon.

Chemical Engineer. Eine ursprünglich aus der Entwicklung der Erdölindustrie in den USA entstandene Ausbildungsform des Ingenieurs, der mit Rücksicht auf

die Anforderungen der Ölindustrie und später der gesamten chemischen Industrie hinsichtlich der Konstruktion, des Baues und des Betriebes der immer mehr wachsenden und komplizierter werdenden Anlagen sowohl Chemiker als auch Ingenieur sein sollte. Es erwies sich als undurchführbar, solche Fachleute auszubilden. Der heutige C.I. angelsächsischer Prägung ist im wesentlichen Maschineningenieur mit mehr oder weniger stark betonter chemischer Ausbildung, z. T. als Zusatzausbildung, z. T. auf Kosten der Maschinenbaufächer. Der Begriff deckt sich i. a. nicht mit dem deutschen *Verfahrensingenieur oder *Chemieingenieur. [2]

Chemical Engineering ist das Ausbildungs- und Arbeitsgebiet des *Chemical Engineers an den amerikanischen und englischen Universitäten bzw. in der amerikanischen und englischen Industrie. In zunehmendem Maße greifen C. E. und *Nuclear Engineering ineinander über. [2]

Lit.: W. L. Badger u. W. L. McCabe, Elements of Chemical Engineering, McGraw-Hill, New York, 1936.

Chemie, heiße, ist ein Ausdruck zur Bezeichnung der Chemie hochradioaktiver Stoffe. Eine präzise Einstufung in „lau“, „warm“ und „heiß“ besteht nicht. Oft wird folgende Unterteilung vorgenommen: für Aktivitäten bis zu 10^{-3} Curie benutzt man die Bezeichnung „lau“, für solche von 10^{-3} bis 10 Curie „warm“ und für Aktivitäten über 10 Curie die Bezeichnung „heiß“, wobei die Grenzen um eine Zehnerpotenz nach oben oder nach unten schwanken können. Bei allen Operationen ist die Beachtung strahlenchemischer Prozesse notwendig. [22]

engl.: hot atom chemistry

franz.: chimie chaude, chimie des atomes chauds

Chemie-Ingenieur. Im wesentlichen sind darunter (Maschinen-)Ingenieure zu verstehen, die in der chemischen Industrie tätig sind. Der Begriff wird mehr und mehr durch denjenigen des *Verfahrensingenieurs verdrängt. [2]

engl.: chemical engineer *franz.: ingénieur chimiste*

Lit.: A. Eucken u. M. Jakob, Der Chemie-Ingenieur, Handbuch der physikalischen Arbeitsmethoden in chemischen und verwandten Industriebetrieben, Leipzig, 1940.

Chlor 36 und 38. Von diesen weit verbreiteten Halogen ist in der Isotopentechnik das langlebige ^{36}Cl mit kleiner spezifischer Aktivität und das kurzlebige ^{38}Cl hoher spezifischer Aktivität gebräuchlich. Die Halbwertszeit des ^{36}Cl beträgt $3 \cdot 10^5$ Jahre, die des ^{38}Cl 38 Minuten. Chlorisotope dienen hauptsächlich als *Leitisotope, als *Indikatoren bei der *Neutronenaktivierungsanalyse und als radiochemische Reagenzien. ^{38}Cl ist wegen seiner sehr harten Betastrahlkomponente von 4,81 MeV Energie bedeutsam. Die beiden Isotope werden durch Bestrahlung von Cl mit langsamen Neutronen gewonnen. Es laufen dabei die Kernreaktionen ab:

$$^{35}Cl\ (n,\gamma)\ ^{36}Cl \text{ und } ^{37}Cl\ (n,\gamma)\ ^{38}Cl\,.$$

Strahlungsdaten:

^{35}Cl: Betastrahlung: 0,714 MeV,
keine Gammastrahlung

^{38}Cl: Betastrahlung: 1,11 MeV 31 %,
2,77 MeV 16 %,
4,81 MeV 53 %
Gammastrahlung: 1,60 MeV 31 %,
2,15 MeV 47 %. [16]

engl.: chlorine *franz.: chlore*

Chlorophyll, Farbstoff in den Chloroplasten der Zellen grüner Pflanzen, dient der Photosynthese und damit der Assimilation des Kohlenstoffs. C. ist chemisch kein einheitlicher Körper und besteht aus zumindest zwei Komponenten (C. A und C. B). Es enthält ein zentrales Mg-Atom mit vier angehefteten Pyrrolringen und Phytol, zeigt Fluoreszenz, absorbiert vor allem im Rot und Blau und kommt mit Karotin und Xanthophyll vergesellschaftet vor. [28]

engl.: chlorophyll *franz.: chlorophylle*

Chlortrifluorid-Prozeß ist ein Verfahren zur Auflösung und Entgiftung von Urankernbrennstoffen. Die Urankernbrennstoffe werden in diesem Prozeß in Chlortrifluorid in Anwesenheit von Flußsäure und Fluor aufgelöst. Das entstehende UF_6 wird von den Spaltprodukten und vom ClF_3, F_2 und HF mittels fraktionierter Destillation getrennt, die Destillation arbeitet mit Rückfluß, die weniger reine zweite Frak-

tion wird dem Auflösungsbehälter wieder zugeleitet. Das Plutonium und die Spaltprodukte bleiben als Rückstand im Auflösungsbehälter (Reaktionsgefäß) zurück. Die Rückstände werden chemisch aufgelöst und

in anderen Separationsprozessen (z. B. *Redox-Prozeß, *Purex-Prozeß) voneinander getrennt. S. das Fließschema in der Abb. [22]

engl.: chlortrifluorination

franz.: procédé au trifluorure de chlore

Lit.: Symposium on Reprocessing of Irradiatet Fuels, Brüssel, Mai 1957, TID 7534.

Chopper, eine Vorrichtung zum Zerhacken einer Strahlung in einzelne, getrennte Impulse. Für langsame Neutronenstrahlung kann z. B. eine rasch rotierende Blende aus Kadmium als C. dienen. Der englische Ausdruck wird im deutschen auch durch Zerhacker ersetzt. [1]

franz.: sélecteur de vitesses de neutrons, s. stroboscopique périodique, s. stroboscopique rotatoire

Chrom (Cr). Schwermetall mit der Dichte 7,19; Ordnungszahl 24, Atomgewicht 52. Schmelzpunkt 1890 °C, Siedepunkt 2500 °C. Absorptionsquerschnitt

für thermische Neutronen $\Sigma_a = 0{,}25\ cm^{-1}$. Kristallstruktur: kubisch raumzentriert.

C. ist hart, spröd und wenig verformbar. Es besitzt eine gute chemische Beständigkeit und zeigt im polierten Zustand ein glänzendes Aussehen. Daher wird C. häufig für galvanische Überzüge verwendet. Sonst findet C. fast nur als Legierungselement (z. B. für Qualitätsstähle und rostfreie *Stähle) Verwendung. [4]
engl.: chromium
franz.: chrome

Chrom 51, das in der Isotopentechnik gebräuchliche radioaktive Isotop des in der Technik wichtigen Metalls Chrom mit 26,5 Tagen Halbwertszeit. Das Isotop ist primär ein verzweigter K-Strahler. 8 % der Zerfallsakte sind von einer Gammastrahlung mit 0,3 MeV Energie begleitet. ^{51}Cr entsteht bei Bestrahlung von Chrom mit langsamen Neutronen. [16]

Chromatid-Bruch ist ein Chromosomenbruch, bei dem nur eine Längshälfte (Chromatid) z. B. unter der Einwirkung energiereicher Strahlen gebrochen ist. [28]
engl.: chromatid break
franz.: cassure de chromatide

Chromatin, nukleinsäurehaltige, sich leicht mit basischen Farbstoffen anfärbende Substanz des Zellkernes (Chromosomen). [28]
engl.: chromatin
franz.: chromatine

Chromosom. Während der Zellteilung erscheinen in den Zellkernen durch basische Farbstoffe färbbare, konstante fädchen- oder stäbchenförmige Strukturen, die nach vollendeter Zellteilung wieder unsichtbar werden und die als C. bezeichnet werden. Chemisch handelt es sich im wesentlichen um Nukleoproteine. Die reifen pflanzlichen und tierischen Keimzellen sind haploid, d. h. sie weisen n C.n auf, wobei n von 1 bis zu mehreren hundert variieren kann, aber für eine gegebene Spezies konstant ist. Die durch Verschmelzung einer väterlichen und mütterlichen Keimzelle entstehenden somatischen Zellen sind diploid, d. h. sie weisen einen Satz von 2 n C.n auf. Unter M i t o s e versteht man die zur Zellvermehrung führende; es kommt dabei zu einer Längsspaltung und Verdopplung von C.n,

so daß Tochterzellen entstehen, die in bezug auf den diploiden Chromosomensatz identisch sind. Bei der Reifeteilung von Keimzellen, die als Meiose bezeichnet wird, unterbleibt die Längsteilung der C.n, so daß es zur Bildung von haploiden reifen Keimzellen kommt. Die substantiellen Träger der Erbanlagen, die sog. Gene, sind in den C.n lokalisiert und dort in weitgehend konstantem Gefüge linear, d. h. in einer perlschnurartigen Aufeinanderfolge angeordnet. Spontan oder strahleninduziert auftretende Änderungen der linearen Genanordnung bezeichnet man als Chromosomenmutationen.
Der Mensch besitzt 48 C.n, von denen stets zwei einander entsprechen (24 Paare homologer oder gleichartiger C.n). In jedem Paar stammt ein Paarling von der Mutter und der andere vom Vater. Unterschieden werden die Autosomen (nicht geschlechtsbestimmende C.) von den Geschlechtschromosomen (beim Menschen 1 X- und 1 Y-C. [Mann] bzw. 2 X-C. [Frau]). In den C. finden sich in linearer Anordnung die einzelnen, den Organismus charakterisierenden Erbanlagen (Gene). [28]
engl.: chromosome
franz.: chromosome

Chromosomenbruch heißt man das vollständige Zerbrechen in zwei oder mehrere Teile des Chromosoms, z. B. infolge einer Einwirkung von energiereichen Strahlen auf die Zellen eines Organismus. Die Mehrzahl der C. führt zum Untergang der davon betroffenen Zellen, jedoch kann ein in einer Keimzelle entstandener C. auch zu einer Erbänderung führen. [28]
engl.: chromosome breakage
franz.: cassure du chromosome

Chromosomenstückausfall, der Verlust eines Chromosomen-Endstückes. [28]
engl.: deficiency of chromosome
franz.: carence de chromosome

Chromosomentranslokation, die Verlagerung eines Teilstückes eines Chromosoms und Anheftung an ein anderes Chromosom. [28]
engl.: translocation of chromosome
franz.: translocation de chromosome

Chrysoberyl ist ein Mineral aus Beryllium-Aluminium-Oxyd $BeO \cdot Al_2O_3$, eines der für eine Berylliumproduktion nutzbaren Erze. Unter dem Namen Alexandrit wird es als wertvoller roter Edelstein geschätzt. [3]
engl.: chrysoberyl *franz.: chrysobéryl*

CHU (Centigrade heat unit). Im amerikanischen Schrifttum findet man seit einiger Zeit für die Wärmemengeneinheit neben Btu auch die CHU oder PCU (pound centigrade unit). Sie bezieht sich auf die Erwärmung von 1 lb Wasser um 1 Celsiusgrad. Es ist 1 CHU = 1 PCU = 1,8 Btu. [5]

Chugach-Kleinkraftwerk. Von der Chugach Electric Association geplantes, mit finanzieller Hilfe der US-AEC bei Anchorage, Alaska, zu errichtendes kleines Atomkraftwerk. Konstruktion: Nuclear Development Corp. of America. Elektrische Leistung 10 000 kW, Gesamtkosten 20 Mill. $; mit flüssigem *Natriummetall gekühlter, mit *Schwerem Wasser moderierter Reaktor mit leicht angereichertem Uran (unter 1,5 % U-235). Fertigstellung bis 1961. [24]

Ciment Fondu ist ein Aluminium-Zement mit etwa 40 % Al_2O_3-Gehalt. S. Zement. [26]

CIR. Abk. für Canada-India-Reactor, den mit kanadischer Hilfe bei Bombay in Indien im Bau befindlichen Forschungsreaktor mit natürlichem Uran und Schwerem Wasser als Moderator. Kosten 14 Mill. $. [24]

C.I.S.E. Abk. für Centro Informazioni Studi Esperienze, italienisches Atomforschungsinstitut in Mailand, gegründet 1946 mit Unterstützung der Privatindustrie. [24]

City of Orlando-Reaktor, s. LMFR.

Clementine. Name eines amerikanischen *Brutreaktor-Experiments mit schnellen *Neutronen im *Los-Alamos-Laboratorium der AEC. Brennstoff: Plutonium, Leistung 25 kW. Kritisch November 1946, in vollem Betrieb 1949, abgebaut 1953. [24]

Cleveit. Uran-Mineral, das neben U_3O_8 auch Thorium enthält. [3]
engl.: cleveit *franz.: clévéite*

Cluster, s. Nest.

C-Neutronen sind Neutronen mit solcher Energie,

daß sie von den Resonanzen im Cadmium absorbiert werden. Diese liegen im Bereich von 0 bis 0,5 eV. [7]
engl.: C-neutrons *franz.: neutrons C*

C.N.R.N. Abk. für Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari, staatliches allgemeines Koordinationskomitee für Atomfragen in Italien. [24]

Colemanit ist ein Mineral der Zusammensetzung $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5\,H_2O$. Hauptlagerstätte von C. ist Kalifornien. [26]
engl.: colemanite *franz.: colémanite*

Colemanit-Baryt-Beton besteht aus Baryt und Colemanit und Portlandzement. Seine Dichte ist etwa 3,1 g/cm^3, seine Zusammensetzung in Gew.-%: 41 % Ba; 35 % O; 10 % S; 8 % Ca; 0,98 % B; Rest: Fe, H, Mg, Na, Si, Al, Mn. S. Schwerbeton. [26]
engl.: colemanite-barytes concrete
franz.: béton à la colémanite

Colemanit-Zement besteht zu großem Teil aus dem Mineral C., d. h. aus $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5\,H_2O$. S. Zement [26]
engl.: colemanite concrete
franz.: ciment à la colémanite

Columbus, s. Perhapsatron.

Commissariat à l'Énergie Atomique. Staatl. französische Atomenergiebehörde, in deren Händen die militärische und zivile Forschung und Entwicklung auf dem Atomenergiegebiet liegt. Betreibt Urangewinnungsanlagen (*Bouchet), Forschungszentren (*Chatillon, *Saclay), Anlagen zur Erzeugung von Plutonium und Elektrizitätsgewinnung aus Atomenergie (*Marcoule). Zur Zeit ca. 5500 Beschäftigte. Abk.: CEA. [24]

Commonwealth Edison-Atomkraftwerk. Von einer Industriegruppe unter Führung der Commonwealth Edison Co. in den USA geplantes, privates, großes Atomkraftwerk bei Dresden, Ill. Konstruktion: General Electric Co., elektrische Leistung 180 000 kW, Gesamtkosten 45 Mill. $, *Siedewasserreaktor mit 68 t leicht angereichertem Uran (1,1 % U-235), Wasser als Moderator und Kühlmittel, Fertigstellung bis September 1960. [24]

Compton-Effekt. Bei der Streuung einer elektromagnetischen Wellenstrahlung an den Elektronen eines

Atoms hat die Streuwelle nur in der Richtung der ankommenden Welle dieselbe Wellenlänge wie diese, in allen anderen Richtungen (Ausbreitungsrichtung bildet den Winkel φ mit der Ausbreitungsrichtung der ankommenden Welle) eine um $\Delta\lambda$ erhöhte Wellenlänge, wobei allgemein:

$$\Delta\lambda = \lambda_0 (1 - \cos\varphi)$$

ist. Diese Wellenlängenerhöhung durch Streuung nennt man den C. Die Konstante λ_0 heißt Compton-Wellenlänge. Die Theorie des C. betrachtet den Zusammenstoß der ankommenden Photonen mit den streuenden Elektronen wie den Stoß einer Billardkugel auf eine andere und erhält durch Anwendung des Energie- und Impulssatzes die obige Richtungsabhängigkeit der Wellenlängenänderung und für λ_0 den Wert h/mc, wo h das Plancksche Wirkungsquantum, m die Ruhmasse des Elektrons und c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Ausgerechnet ergibt dies 0,024 Å.
Anschaulich kann man den C. so verstehen, daß ein Photon der Energie $h\nu$ (ν Frequenz) beim Stoß auf ein Elektron einen kleinen Teil seiner Energie an dieses überträgt (das Elektron fliegt wie eine gestoßene Billardkugel seitlich weg) und mit verringerter Energie $h\nu'$ weiterfliegt. Das bedeutet aber eine verringerte Frequenz ν' oder eine erhöhte Wellenlänge.
Durch Einzelbeobachtung der gestreuten Photonen und der weggestoßenen Elektronen mit Zählvorrichtungen konnte nachgewiesen werden, daß tatsächlich zu jedem Photon ein „Rückstoßelektron“ gehört, und daß zwischen den Richtungen dieser beiden die theoretisch geforderte Winkelbeziehung besteht. Dies ist einer der wichtigsten Beweise dafür, daß auch bei Elementarvorgängen im atomaren Bereich der Energie- und Impulssatz streng gültig sind. Der Begriff der Compton-Wellenlänge wird auf andere Elementarteilchen ausgedehnt, indem man in dem Ausdruck h/mc für m die Ruhmasse dieses Elementarteilchens, z. B. des Protons, einsetzt. [1]

engl.: Compton effect *franz.: effet Compton*

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1958.

Compton-Spektrometer, s. Nachtrag.

Compton-Streuung, s. Compton-Effekt.

Compton-Wellenlänge, s. Compton-Effekt.
engl.: Compton wave length
franz.: longueur d'onde de Compton

Consolidated Edison-Atomkraftwerk. Von der Consolidated Edison Co., New York, geplantes, privates, großes Atomkraftwerk bei Indian Point, 40 km von New York. Konstruktion: Babcock & Wilcox Co., elektrische Leistung gesamt 250 000 kW, davon 110 000 kW durch ölbefeuerten Nachüberhitzer, Gesamtkosten 55 Mill. $, *Druckwasserreaktor mit 275 kg hoch angereichertem Uran (90 % U-235), Wasser als Moderator und Kühlmittel, Fertigstellung bis September 1960. [24]

Contamination, s. Kontamination.

Coracit. Sekundäres Uranmineral mit bis zu 60 % U_3O_8 verunreinigtem *Gummit. [3]
engl.: coracite *franz.: coracite*

Cosinusquelle. Sie emittiert pro Sekunde je Oberflächeneinheit $\cos\vartheta/4\pi$ für $0 < \vartheta < \pi/2$ und 0 für $\pi/2 < \vartheta < \pi$. ϑ ist der Winkel zwischen Ausstrahlrichtung und Oberflächennormale. [26]
engl.: cosine surface source
franz.: source de Lambert

Cosmotron, s. Kosmotron.

Coulomb-Integral, s. Hydromagnetische Gleichungen.
engl.: Coulomb integral *franz.: intégral de Coulomb*

Coulomb-Kraft heißt die Kraft, die zwei punktförmige elektrische Ladungen gemäß dem Coulombschen Gesetz aufeinander ausüben. Sie beträgt im Vakuum:

$$K = \gamma \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

wobei q_1 und q_2 die Größe der beiden Ladungen, r ihr Abstand und γ ein vom Maßsystem abhängiger Faktor ist. [1]
engl.: Coulomb force *franz.: force de Coulomb*

Coulomb-Potential heißt das Potential einer punktförmigen elektrischen Ladung im Vakuum (oder in homogener Materie). Es nimmt mit der Entfernung von der Ladung wie r^{-1} ab. [1]
engl.: Coulomb potential *franz.: potentiel de Coulomb*

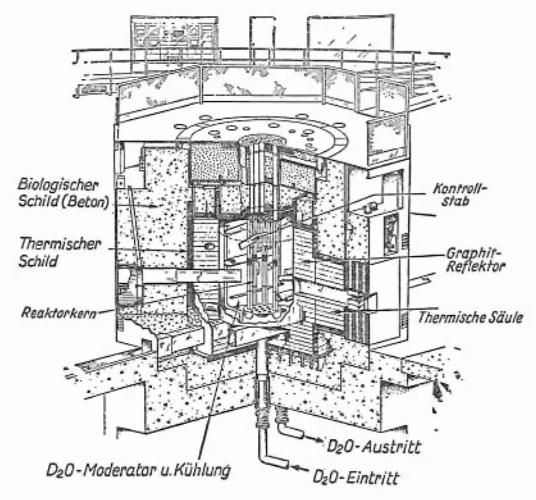
Coulomb-Wechselwirkung, s. Mikrofelder im Plasma.
engl.: Coulomb interaction
franz.: action de Coulomb

CP, Abk. für Chicago Pile, eine Serie von *Forschungs- und Versuchsreaktoren in und bei Chicago.
CP-1, erster Reaktor der Welt, 200 Watt Wärmeleistung, 6,5 t Uranmetall, 40 t Uranoxyd, graphit-moderiert. Errichtet vom *Manhattan Engineering District, kritisch am 5. Dezember 1942, abgebaut am 1. März 1943 in CP-2.
CP-2, Nachfolger von CP-1, in Betrieb von März 1943 bis Mai 1954, auf ca. 2 kW erhöhte Leistung.
CP-3, Versuchsreaktor mit Uranmetall und Schwerem Wasser als Moderator. Wärmeleistung 300 kW. Erster Schwerwasserreaktor der Welt, gebaut vom *Argonne National Laboratory der AEG, in Betrieb seit Mai 1944, umgebaut 1950 nach Brennstoffelementedefekt in CP-3′.
CP-3′, Weiterentwicklung von CP-3 mit angereichertem Uran (90 % U-235), in Betrieb seit Juli 1950, ersetzt 1954 durch CP-5.
CP-5, Schwerwasser-Forschungsreaktor mit auf 90 % U-235 angereichertem Uran und erhöhter Wärmeleistung (1000–5000 kW). Kosten 1 Mill. \$ (+ 2 Mill. \$ für Entwicklungsarbeiten) ohne Brennstoff- und Moderatormaterial. In Betrieb seit Februar 1954. Er hat gegenüber seinen Vorgängern einen höheren Neutronenfluß. Dieser Reaktortyp vereinigt in sich die Vorzüge hochangereicherten Brennstoffes mit denen des schwerwasser-moderierten Reaktors.

1. Infolge hoher Anreicherung ist hoher Abbrand möglich, damit Verringerung der Betriebskosten.
2. Bei kleiner installierter Leistung, d. h. wenig Spaltstoff, ist hoher Neutronenfluß möglich.
3. Geringe Neutronenabsorption in Moderator und U-238.
4. Hohe Betriebssicherheit infolge des in allen Betriebslagen negativen Temperaturkoeffizienten.

Einen Querschnitt durch CP 5 vermittelt die Abb. In

einem zylindrischen Aluminiumtank (Durchmesser 183 cm, Höhe 228 cm) ist der Reaktorkern untergebracht (Durchmesser 60 cm, Höhe 60 cm). Der Reaktorkern enthält im Normalbetrieb bei 1 MW zwölf *Brennstoffelemente vom MTR-Typ mit je zehn Spaltstoffplatten mit insgesamt 1680 g U-235. Mit dieser Spaltstoffmenge läßt sich der Reaktorbetrieb etwa zwei Monate lang aufrechterhalten, d. h. lassen sich die bei einem Fluß von min. $2{,}8 \cdot 10^{13}$ n/cm² s ent-



stehenden Reaktorgifte sowie der Abbrand kompensieren. Es können 17 Elemente eingesetzt werden. Damit läßt sich der Betrieb ohne Brennstoffwechsel ein Jahr lang durchführen. Die Brennstoffelemente werden von unten von schwerem Wasser durchströmt. Oberhalb der Spaltzone tritt das D_2O durch Schlitze aus dem Element aus und wirkt als Moderator, teilweise als Reflektor, weiter (D_2O-Reflektordicke 60 cm). Außerhalb des Tanks befindet sich ein zusätzlicher Reflektor aus Graphit, ebenfalls 60 cm stark. Der thermische Schild (Al-Platte mit Borcarbid + Pb-Schicht) und eine 1,5 m dicke Betonschicht schließen den Reaktor nach außen ab. Im oberen Schaft des Elements ist

ein kleiner Schwimmer als Strömungsanzeiger untergebracht, Aussetzen des Wasserstromes durch ein Element wird am Steuerpult angezeigt. Der Reaktor wird mit einem Cd-Kontrollstab gesteuert, der vertikal ins reflektierende D_2O eintaucht. Sicherheitsabschaltung erfolgt durch 4 Cd-Elemente vom Signalarmtyp, die zwischen den Brennstoffelementen hindurchgreifen. Dazu kann im Notfall der Wasserspiegel innerhalb 30 s um 64 cm bis zum oberen Rand der Brennstoffplatten gesenkt werden. Die Spaltwärme wird vom D_2O in einem Wärmetauscher außerhalb des Reaktors an leichtes Wasser abgegeben. Über dem D_2O-Spiegel befindet sich eine Heliumatmosphäre zur Sicherung gegen Luftfeuchtigkeitseinbrüche, sowie zur Verdünnung und gefahrlosen Rekombination des entstehenden Knallgases. Der Reaktor besitzt eine ganze Reihe von Experimentierkanälen (vertikale und horizontale), die teilweise bis nahe an die Spaltzone herangeführt sind. Dimensionen des Reaktors: Durchmesser 6,1 m, Höhe 4,1 m. [24, 25]

Lit.: Nucl. Eng. 1, Heft 2, 1956. – S. Glasstone, Principles of Nuclear Reactor Engineering S. 809, D. van Nostrand, New York, 1955. – Zinn, Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 2, S. 456, 1955. – Proc. of the Kjeller Conf. on Heavy Water Reactors, Jener Publications, S. 21.

cpm, Abk. für counts per minute = Zählbare Ereignisse je Minute. [6]

cps, Abk. für counts per second = Zählbare Ereignisse je Sekunde. [6]

CRO, Abk. für cathode ray oscilloscope, Kathodenstrahloszillograph. [6]

CRT, Abk. für cathode ray tube = Kathodenstrahlröhre. [6]

Crud, aus dem Englischen stammende Bezeichnung für feste, nicht lösliche Rückstände bei der Brennstoffaufbereitung (feste Rückstände in Auflösungsbehältern, im *Mixer Settler usw.). Diese werden, da die festen Rückstände die Auflösung von Kernbrennstoffen mittels Säuren katalytisch beschleunigen, teilweise absichtlich bei Neubeschickung von Auflösebehältern mit neuem Material nicht entfernt. [22]

CTR. Abk. für *Cannel Test Reactor*, Versuchsreaktor der US-Luftwaffe und der Firma Pratt & Whitney für Entwicklung eines Atomflugzeugantriebs (Entwurf: Walter Kidde Nuclear Laboratory). [24]

Curie, 1. Einheit der Menge einer Substanz der Uran-Radium-Reihe, die mit 1 g reinem Radium im radioaktiven Gleichgewicht steht (Definition der Internationalen Radium-Standard-Kommission aus dem Jahr 1930).
2. Einheit der Aktivität eines radioaktiven Präparats. Dieses hat dann die Aktivität 1 Curie (1 c), wenn in ihm $3{,}700 \cdot 10^{10}$ Atome in der Sekunde zerfallen (s. Zerfall, radioaktiver), d. h. innerhalb der derzeitigen Meßgenauigkeit ebenso viele wie in 1 g reinem Radium (ohne Folgeprodukte) (Joint Commission of Radioactive Standards, Units and Constants, 1950).
Der tausendste, millionste, milliardste Teil eines Curie ist das Millicurie (mc), Mikrocurie (μc) und Nanocurie (nc). Bei einem Präparat von 1 nc Stärke zerfallen also 37 Atome je Sekunde. [1]
engl.: curie *franz.: curie*

Curit. Sekundäres bleihaltiges Uranmineral, orangefarben, mit ca. 75 % UO_3-Gehalt

$$(2\,PbO \cdot 5\,UO_3 \cdot 4\,H_2O). \qquad [24]$$

engl.: curit
franz.: curite

Curium, das vierte der künstlich hergestellten „Transurane". Ordnungszahl 96. Chemisches Symbol Cm. Das wichtigste Isotop hat die Massenzahl 242 und ist zusammen mit dem Americium von Seaborg gewonnen worden. Es entsteht aus dem β-radioaktiven Americiumisotop 242 von selbst mit einer Halbwertszeit von 18 Stunden oder kann durch α-Bestrahlung des Plutoniumisotops 239 erhalten werden. Es ist selbst α-radioaktiv mit einer Halbwertszeit von fünf Monaten. Inzwischen konnten noch elf weitere Isotope mit Massenzahlen zwischen 238 und 249 aufgefunden werden. Unter ihnen ist das ^{245}Cm das langlebigste. Es ist ein α-Strahler von 20 000 Jahren Halbwertszeit. Das C. ist ein wichtiger Ausgangsstoff für die noch höheren

Transurane. In seinen chemischen Verbindungen verhält es sich 3wertig. [1]
engl.: curium
franz.: curium

Lit.: O. Hahn, Künstliche neue Elemente, Chemie, Weinheim, 1948. – Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen, I. Bd., 5. Teil, 6. Aufl., Springer, Berlin, 1952.

Cyklotron, s. Zyklotron.

Cystein, α-amino-β-Thiopropionsäure

$$(HS-CH_2-\underset{\displaystyle NH_2}{\underset{|}{C}H}-COOH).$$

C. vermag bei Verabreichung an Tiere (Mäuse, Ratten) vor der Einwirkung einer subletalen Dosis die Resistenz der Tiere gegenüber energiereichen Strahlen zu erhöhen („Strahlenschutzkörper"). Der gleiche Effekt kann auch mit dem Decarboxylierungsprodukt des C., dem Cysteamin (und dessen Disulfid: Cystamin) erreicht werden. [28]
engl.: cysteine
franz.: cystéine

D

d, Zeichen für das Deuteron. [7]

D, Zeichen für Deuterium. [7]

DAK, Abk. für *Deutsche Atomkommission. [24]

Dampfabscheider, eingebaute Vorrichtungen oder zwischengeschaltete Apparate, welche die Aufgabe haben, nassen Dampf zu trocknen, d. h. unerwünschtes Wasser vom Sattdampf zu trennen. Die Wirkungsweise beruht auf Fliehkraft und Prallwirkung (D.-Zyclone, Prallbleche). D. sind im Reaktorbau z. B. bei Siedewasserreaktoren und kraftwerksseitig bei Sattdampfturbinen erforderlich. [8]
engl.: steam separator
franz.: séparateur de vapeur

Dampfblasenkoeffizient der Reaktivität, s. Blasenkoeffizient.

Dampfdestillation. Eine Substanz, die nicht oder nur sehr schlecht mit Wasser mischbar ist, wird mit

Wasser zusammen erhitzt und durch diese Mischung Wasserdampf geleitet. Der niedrige Dampfdruck der Substanz und der Dampfdruck des heißen Wasserdampfes erreichen leicht Atmosphärendruck, so daß eine Destillation vor sich gehen kann. Neben sehr viel Wasser geht ein geringer Anteil der gereinigten Substanz über. [18]
engl.: steam distillation
franz.: entraînement à la vapeur

Dampfdruck von Isotopen. Die Berechnung des D.-Verhältnisses isotoper Moleküle geht von der allgemeinen D.-Gleichung aus:

$$\ln p = -\frac{\lambda_0}{R\,T} + \frac{C_{p_0}}{R}\ln T + \frac{1}{R}\int_0^T \frac{\mathrm{d}T}{T^2} \int_0^T (C_{sG} - C_{pk})\,\mathrm{d}T + 2{,}303\,(J_g - J_k) + \alpha\ ;$$

darin bedeuten: λ_0 Verdampfungs- bzw. Sublimationswärme bei $T = 0\ ^\circ\mathrm{K}$, C_{p_0} Translations- und Rotationsanteil der Molwärme des Gases, C_s Schwingungsanteil der Molwärme, $J_p = J_{\mathrm{Gas}} - J_{\mathrm{kond}}$ Dampfdruckkonstante, α Korrektur zur Berücksichtigung der Abweichungen vom idealen Gasgesetz.
Aus ihr ergibt sich das Dampfdruckverhältnis zweier isotoper Moleküle:

$$\ln\frac{P_l}{p_s} = -\frac{\lambda_{0l} - \lambda_{0s}}{R\,T} + \frac{1}{R}\int_0^T \frac{\mathrm{d}T}{T^2}\int_0^T (C_{sG_l} - C_{sG_s})\cdot \mathrm{d}T - \frac{1}{R}\int_0^T \frac{\mathrm{d}T}{T^2}\int_0^T (C_{pkl} - C_{pks})\,\mathrm{d}T$$

$$+\ 2{,}303\ (J_{gl} - J_{gs}) - 2{,}303\ (J_{kl} - J_{ks}) + (\alpha_l - \alpha_s)\ ;$$

l bezieht sich auf das Molekül mit dem leichten, s auf das Molekül mit dem schweren Isotop.

Die Verdampfungswärmen λ_0 am absoluten Nullpunkt

unterscheiden sich – unter der Voraussetzung gleicher Abhängigkeit der potentiellen Energie vom Teilchenabstand im Gitter – um die Differenz der Nullpunktsenergie. Nach der Theorie von Debye ist

$$E_0 = \frac{9}{8} R \, \Theta_{\text{Debye}}$$

$[\Theta_{\text{Debye}} = (h\,\nu/k)_g]$; bei zwei- und mehratomigen Molekülen ist neben den Debye-Schwingungen die Rotation der Moleküle im Gitter zu berücksichtigen (bei tiefen Temperaturen ist die Rotation der Moleküle im Gitter so stark gehemmt, daß nur noch Drehschwingungen möglich sind).

Die spezifischen Wärmen der Gase ergeben sich aus der Planck-Einsteinschen Theorie. Für die Berechnung der spezifischen Wärme von festen Phasen ermöglicht die Debye-Theorie einen Ansatz; eine exakte Berechnung der Werte für die flüssige Phase ist nicht möglich. Die D.-Unterschiede isotoper Moleküle sind deshalb nur bis zum Tripelpunkt theoretisch berechenbar.

Die D.-Konstanten isotoper Moleküle unterscheiden sich nur in den masseabhängigen Gliedern (für zweiatomige Moleküle ist

$$J_l - J_s = \frac{3}{2} \log \frac{M_l}{M_s} + \log \frac{I_l}{I_s} \,);$$

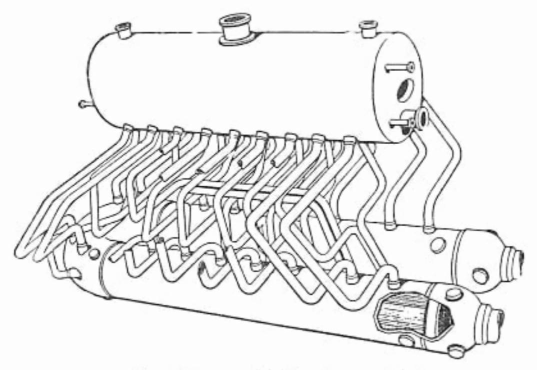
die chemischen Konstanten der kondensierten Phasen können als gleich angenommen werden $(J_{k_l} = J_{k_s})$. Auch die Korrekturen wegen der Realität der Gase sind als gleich anzunehmen $(\alpha_l = \alpha_s)$.

Es sind isotope Moleküle bekannt, die trotz größerer Masse und größeren Trägheitsmomentes größeren D. haben als andere gleicher chemischer Zusammensetzung; der Grund liegt in höherer Asymmetrie, die zu geringerer Bindungsfestigkeit in der kondensierten Phase führt, weil die Schwingungsrotationen bei den asymmetrischen Sorten zu etwas größerem Molvolumen Anlaß geben.

Unterschiede in der van der Waalschen Anziehung können ferner durch infrarote Absorptionsbanden der Moleküle bei Wechselwirkung mit ultravioletter Absorption und Polarisierbarkeit hervorgerufen werden:

durch sie kann der D. der schweren Teilchen größer werden als der der leichten. [14]
engl.: vapour pressure
franz.: pression de vapeur, tension de vapeur

Dampferzeuger (s. Kessel). Der Begriff betrifft in der Reaktortechnik *Wärmetauscher, bei denen auf der Sekundärseite (kälteren Seite) Wasser verdampft und evtl. überhitzt wird. Da meist nur geringe Temperaturdifferenzen zulässig sind, ergeben sich große Heizflächen und damit große Abmessungen. [8]
engl.: steam generator
franz.: générateur de vapeur



Dampferzeuger für Druckwasserreaktor

Dampferzeugung in Reaktoren. Das Sieden des Kühlmittels kann in Reaktoren einerseits zur Steigerung der Wärmeübergangszahlen dienen, andererseits zur Erzeugung von Dampf als Arbeitsmittel in einem Dampfturbinenprozeß. Von der ersten Möglichkeit macht man z. T. in Druckwasserreaktoren Gebrauch. Hier befindet sich zwar das Kühlmittel im Primärkreislauf stets unterhalb der Sättigungstemperatur, jedoch kommt es bei einer bestimmten Heizflächenbelastung in der Strömungsgrenzschicht zu örtlichem Sieden, wobei die entstehenden Dampfblasen nach kurzer Zeit in der unterkühlten Flüssigkeit wieder kondensieren (siehe *Wärmeüber-

gang bei Verdampfung). Durch diesen Vorgang wird die Wärmeübergangszahl beträchtlich vergrößert und es ist daher möglich, die Leistung eines Reaktors zu steigern, ohne die Grenztemperatur in den Brennstoffstäben zu überschreiten. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Strömung unter Umständen instabil wird, sobald die Verdampfung eintritt (siehe *Instabilität der Kühlmittelströmung). Bei Siedewasserreaktoren tritt das meist als Moderator und Kühlmittel verwendete Wasser etwas unterkühlt in den Reaktor ein, wird im unteren Teil der Spaltzone bis zur Sättigungstemperatur erwärmt und anschließend zum Teil verdampft. Der dabei auftretende Siedevorgang wird als Blasenverdampfung bezeichnet. Der erzeugte Sattdampf wird über eine Turbine und einen Kondensator entspannt. Das aus der Spaltzone austretende, nicht verdampfte, jedoch gesättigte Wasser wird diesem wieder zugeführt, nachdem es mit dem Speisewasser gemischt und somit etwas unterkühlt wurde. Die Zirkulation des Kühlmittels kann dabei durch natürliche Konvektion aufrechterhalten werden. Die Kühlmittelgeschwindigkeit läßt sich durch Kamine steigern, die über der Spaltzone angebracht sind. Der erzeugte Sattdampf kann auch in einem Wärmetauscher kondensiert werden und dabei seine Verdampfungswärme an das Kühlmittel eines Sekundärkreislaufes abgeben. Die Leistung eines Siedewasserreaktors ist begrenzt durch das für die Spaltzone zulässige Dampfvolumen. Das Alter der Neutronen und die Leckverluste nehmen mit wachsendem Dampfvolumen zu, jedoch vergrößern sich dabei auch der Faktor für schnelle Spaltung ε, die thermische Nutzung f und u. U. auch die Bremsnutzung p. Man hat daher bei der Auslegung der Spaltzone darauf zu achten, daß die resultierende Reaktivitätsänderung nicht positiv wird. Das Verhältnis von Reaktivität in Prozent zu dem Anteil des Dampfvolumens in Prozent bezeichnet man als *Blasenkoeffizient (*void coefficient*, dieser ist z. B. für den EBWR $-0{,}11$ bei 42 at und 15 % Dampfvolumen). Bei einer plötzlichen Zunahme des Leistungsbedarfes verringert sich der Druck, so daß im Reaktor mehr Dampf erzeugt wird und bei negativem Blasen-

koeffizienten der effektive Vermehrungsfaktor sinkt. Bei einem hohen Blasenkoeffizienten kann die Reaktivität nicht ohne die Erregung von Leistungsschwingungen ausgeregelt werden. Ist der Blasenkoeffizient bekannt, so ist mit der zulässigen Reaktivität auch das zulässige Dampfvolumen festgelegt. Um bei gegebenem Dampfvolumen im Reaktor eine möglichst hohe Leistung zu erzielen, ist man bestrebt, die Strömungsgeschwindigkeit hoch zu halten und den Verdampfungsvorgang auf einen kleinen Bereich zu beschränken. Man erhält dadurch eine größere Dampfmenge je Zeiteinheit und eine stärkere Unterkühlung des eintretenden Wassers. Trotzdem sind die dabei erreichbaren Leistungsdichten nicht sehr hoch. Höhere Leistung und auch ein besseres Regelverhalten läßt sich erzielen, wenn man einen Teil des gesättigten Wassers durch einen Wärmeaustauscher leitet. In diesem wird auf der Sekundärseite Dampf erzeugt und dem Niederdruckteil der Turbine zugeführt. Die dadurch erzielte größere Unterkühlung ermöglicht eine höhere Leistungsdichte *(dual cycle)*. Da ein großer Teil der Leistung durch den Wasserkreislauf abgeführt wird, ändert sich das Dampfvolumen im Reaktor bei Schwankungen des Leistungsbedarfs nicht so stark, wie bei einem Siedewasserreaktor mit einfachem Kreislauf. [5]

engl.: steam generation in reactors
franz.: production de vapeur en réacteurs
Lit.: C. F. Bonilla, Nuclear Engineering, McGraw-Hill, New York, 1957.

Dampfkreislauf, s. Kühlmittelkreisläufe.

Dampfzählrohr, s. Zählrohr.

DAR, Abk. f. differential absorption ratio, quantitatives Verhältnis der Radioaktivität in einem Organ zu derjenigen im Gesamtkörper. [28]

Darex-Prozeß, amerikanische Bezeichnung für die *Auflösung von Edelstahl-legierten oder umhüllten Brennstoffelementen in konzentriertem Königswasser und anschließender Aufbereitung (Extraktion) der stark mit Wasser verdünnten königsauren „Primärlösung“ (dilute aqua regia extraction = DAREX). Nachteile dieses Verfahrens sind die großen Korro-

sionsgeschwindigkeiten des Behältermaterials sowohl für die Auflösung selber, als auch für die Lagerung der Konzentrate von radioaktiven Stoffen. Als geeignete Materialien für Auflösungs- und Lagerbehälter haben sich Tantal, Titan und Glas erwiesen. [22]

Dauerbestrahlung, kontinuierliche Strahlenbelastung bis zum Auftreten der Schädigungssymptome bzw. bis zum Tode. [17]
engl.: long continued irradiation
franz.: irradiation prolongée

Dauerbetrieb beim Reaktor, Gegensatz zu *Chargenbetrieb, s. Reaktorbetrieb, kontinuierlicher.

Dauerfestigkeit, s. Dauerversuch.
engl.: fatigue strength, endurance limit
franz.: résistance à la fatigue

Dauerstandfestigkeit, s. Standversuch.
engl.: creep test
franz.: résistance au fluage

Dauerversuch. D.e dienen der Ermittlung von Kennwerten für das mechanische Verhalten von Werkstoffen bei dauernder wechselnder Belastung. Unter Dauerfestigkeit versteht man den größten Spannungsausschlag um eine gegebene Mittelspannung, den eine Probe nach einer großen Zahl von Lastwechseln (für Stahl $10 \cdot 10^6$, für Leichtmetall $100 \cdot 10^6$) ohne Bruch aushält. Ist die Mittelspannung gleich 0, so spricht man von Wechselfestigkeit. D.e werden für verschiedene Beanspruchungsarten (z. B. Zug-, Druck-, Biegungs-, Schlag-, Torsionsbeanspruchung) durchgeführt. Die Dauerfestigkeit beträgt bei Metallen ungefähr $^1/_3$ bis $^1/_2$ der im statischen Versuch (*Zugversuch, *Biegeversuch usw.) ermittelten Festigkeitswerte (*Ermüdung). [4]
engl.: fatigue test, endurance test
franz.: essai de fatigue
Lit.: DIN 50 100

dB, Abk. für Dezibel, 1 dB = 1*/10 Bel. [6]

DBC = *Dibutylcarbinol.

DBM, in Amerika übliches Maß für die mittlere Leistung (z. B. am Ausgang eines Verstärkers) in Dezibel, wobei ein Milliwatt die Vergleichsleistung ist. [6]

DBP = Dibutylphosphat, s. TBP.

Debye-Hückelsche Theorie, Debye-Radius, s. Mikrofelder im Plasma.

Decarboxylieren. Abspaltung von CO_2 aus der Carboxylgruppe einer organischen Säure.

$$(R - COOH \rightarrow R - H + CO_2) .$$

Dieser Effekt tritt in der Chemie nur unter besonderen Bedingungen auf, so z. B. bei der Einwirkung ionisierender Strahlen. [18]

engl.: decarboxylating *franz.: décarboxylation*

Dee, englischer Ausdruck für die Metallkäfige im *Zyklotron, in deren Innerem die Teilchen in einem Raum konstanten Potentials laufen. [1]

engl.: dee *franz.: dé*

Deformation, kritische. Spaltbare Atomkerne werden durch den Einfang eines Neutrons in Oszillationen versetzt, bei denen der Kern die in der Abb. dargestellten Stadien durchlaufen kann. Reicht die zugeführte Energie nicht aus, die Deformation des Kerns über das Stadium 2 hinauszutreiben, so wird der Kern schließlich zur Kugelform zurückkehren und die Überschußenergie durch Ausstoß eines Teilchens (zumeist ein Gammaquant) abgeben. Reicht die zugeführte Energie jedoch aus, eine bestimmte k. D. (Stadium 3) zu erreichen, so kehrt der Kern nicht mehr zur Kugelform zurück, sondern spaltet in zwei Bruchstücke (4 und 5). Das Auftreten einer k. D. kann man qualitativ aus dem Wechselspiel zwischen den anziehenden *Kernkräften mit kurzer Reichweite und den abstoßenden *Coulombkräften mit großer Reichweite erklären. Bei der Deformation des Kerns verkleinern sich die ersteren rascher, so daß bei einer bestimmten k. D. die Coulombkräfte das Übergewicht gewinnen.

1
2
3
4
5

Die k. D. kann bei den Spaltstoffkernen (U^{233}, U^{235}, Pu^{239}) schon durch die Bindungsenergie des Neutrons bewirkt werden, so daß auch Neutronen fast ohne Bewegungsenergie (thermische Neutronen) den Kern zu spalten vermögen. Brutstoffkerne (Th^{232}, U^{238}) erfordern eine höhere Energie-

zufuhr, um die k. D. zu erreichen. Dementsprechend sind sie erst ab einer bestimmten Schwellenenergie durch schnelle Neutronen spaltbar. [13]
engl.: critical deformation
franz.: déformation critique

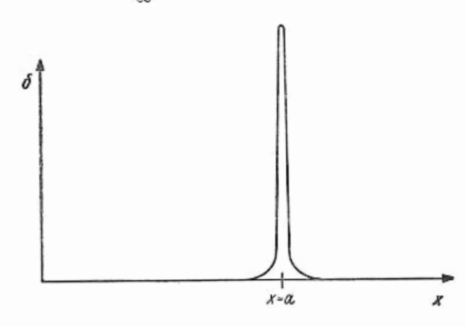
Deformationsband. Gebiete in einem Kristall, welche infolge einer vorausgegangenen *Gleitung verschiedene kristallographische *Orientierung haben. [4]
engl.: deformation band
franz.: bande de déformation
Lit.: P. Haasen u. G. Leibfried, Die plastische Verformung von Metallkristallen und ihre physikalischen Grundlagen, Fortschr. d. Physik 2, 73, 1954.

Dekalin wird bei den Aufbereitungsprozessen (s. Kernbrennstoffaufbereitung) als Verdünnungsmittel des organischen Extraktionsmittels Tributylphosphat (TBP) neben Kerosin angewandt. Es ist ein hydriertes Naphthalen. [22]
engl.: decaline *franz.: décaline*

Dekontamination, s. 1. Entgiftung, 2. Entseuchung; vgl. auch Kontamination.
engl.: decontamination *franz.: décontamination*

Delta-Funktion ist eine uneigentliche Funktion, die von D i r a c bei der Behandlung von quantenmechanischen Problemen eingeführt wurde. Sie ist definiert durch die folgende Eigenschaft: Es ist
$\delta(x-a)=0$, wenn $x \neq a$. An der Stelle $x = a$ ist sie in der Weise singulär, daß

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-a)\,\mathrm{d}x = 1\,.$$



Den angenäherten Verlauf gibt die Abb. wieder. Die δ-F. ist im Einzelfall stets durch analytische Funktionen darstellbar, die Schreibweise wird aber viel umständlicher.

Die Einführung der δ-F. verursacht daher keinen Mangel an Strenge in der Theorie. Man kann sie so benutzen, als ob sie eine stetige Funktion wäre, ohne daß man dabei zu falschen Ergebnissen kommt. Die elementaren Eigenschaften der δ-F. sind:

$$\delta(-x) = \delta(x)$$

$$x\,\delta(x) = 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot \delta(x - a)\,\mathrm{d}x = f(a)$$

wobei $f(x)$ irgendeine stetige Funktion von x und a eine beliebige Zahl ist. Die Grenzen $-\infty$ und $+\infty$ könnten ebensogut auch durch die Endpunkte eines beliebigen Intervalls ersetzt werden, das den Punkt $x = a$ enthält, also z. B. durch $a - \varepsilon$ und $a + \varepsilon$.

Neben $\delta(x)$ gebraucht man auch die Ableitungen der Funktion. Die Differentialquotienten sind nun allerdings noch weniger stetige und noch stärker uneigentliche Funktionen als $\delta(x)$ selbst. Aber auch diese können so gebraucht werden, als ob sie stetige Funktionen wären, ohne daß man dadurch zu falschen Ergebnissen kommt. Hierfür gilt:

$$\delta'(-x) = -\delta'(x)$$

$$x \cdot \delta'(x) = -\delta(x)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot \delta'(x - a)\,\mathrm{d}x = -f'(a).$$

Ähnliche Regeln gelten auch für die höheren Ableitungen.

Die Schreibweise ist in das Mehrdimensionale zu übertragen. Für eine dreidimensionale δ-F. schreibt man $\delta(\mathfrak{r} - \mathfrak{a})$. Sie ist definiert als das Produkt der drei eindimensionalen δ-F.:

$$\delta(\mathfrak{r} - \mathfrak{a}) \equiv \delta(x_1 - a_1) \cdot \delta(x_2 - a_2) \cdot \delta(x_3 - a_3).$$

Für den Gebrauch der δ-F. geben wir ein Beispiel: Es mögen sich im Raum einzelne elektrische Elementarladungen befinden (Elektronen). Die geringe Zahl der

Ladungen oder das gestellte Problem rechtfertige nicht, daß diese Ladungsverteilung näherungsweise als kontinuierlich aufgefaßt werden kann. Dann hat man auszudrücken, daß die Ladungsdichte im Raum überall null ist mit Ausnahme der Stellen, an denen sich gerade ein Elektron befindet. Seien diese Stellen gekennzeichnet durch die evtl. von der Zeit abhängigen Ortsvektoren $\mathfrak{a}_n$ mit den Koordinaten a_1^n, a_2^n, a_3^n, so ist die „Dichte" zu schreiben als

$$\varrho(\mathfrak{r}) = e \cdot \sum_n \delta(\mathfrak{r} - \mathfrak{a}_n) =$$

$$= e \cdot \sum_n \delta(x_1 - a_1^n) \cdot \delta(x_2 - a_2^n) \cdot \delta(x_3 - a_3^n).$$

Integriert man über den Raum, so erhält man die Zahl der darin enthaltenen Ladungen, also

$$\int \varrho(\mathfrak{r})\,\mathrm{d}\tau = \iiint \varrho(x_1, x_2, x_3)\,\mathrm{d}x_1\,\mathrm{d}x_2\,\mathrm{d}x_3 =$$

$$= e \sum_n \iiint \delta(\mathfrak{r} - \mathfrak{a}_n)\,\mathrm{d}x_1\,\mathrm{d}x_2\,\mathrm{d}x_3 = e \cdot n\,.$$

Sind z. B. drei Ladungen vorgegeben, so besteht die Summe aus drei Summanden, von denen jeder gleich 1 ist.

Die δ-F. steht in einer gewissen Parallele zu dem Kroneckerschen δ-Symbol

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ wenn } i = k \\ 0 \text{ wenn } i \neq k \end{cases}$$

Während das Kronecker-Symbol für diskrete Werte von i und k gilt, gilt die Diracsche δ-F. für kontinuierlich veränderliche Variable. [7]

engl.: δ-function

franz.: fonction delta

Delta-Operator, Laplacescher Operator, in der Vektorrechnung viel gebrauchter Differentialoperator. Läßt sich ein Vektor $\mathfrak{A}$ darstellen als Gradient eines Skalars Φ, gilt also die Beziehung

$$\mathfrak{A} = \operatorname{grd} \Phi$$

und wird von diesem Vektor die Divergenz gebildet, dann schreibt man an Stelle von

$$\operatorname{div} \mathfrak{A} = \operatorname{div} \operatorname{grd} \Phi$$

zur Abkürzung auch

$$\operatorname{div} \mathfrak{A} = \Delta \Phi ,$$

indem man anstatt div grd zur Abkürzung den Operator Δ einführt. In kartesischen Koordinaten ist

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} .$$

In räumlichen Polarkoordinaten gilt:

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \\ + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta} \right).$$

Für das Potential Φ der Mechanik und der Elektrostatik gilt im ladungsfreien Raum die Laplacesche Differentialgleichung

$$\Delta \Phi = 0 .$$

[7]

engl.: δ-operator, laplacian *franz.: laplacien*

Delta-Strahlen, Delta-Elektronen. Die beim Durchgang von Korpuskularstrahlen, insbesondere von α-Strahlen und β-Strahlen durch Materie infolge Ionisation der Atome entstehenden sekundären Elektronen, die mit erheblicher Energie wegfliegen und dadurch selbst den Charakter von Korpuskularstrahlen haben, werden als D.-S. bezeichnet. Ihre Energie ist über ein weites Energiegebiet verteilt; die Verteilungskurve hängt von der Art und Energie der primären Korpuskeln ab. Die größte Zahl der entstehenden D.-S. hat Energien von nur wenigen eV, jedoch treten auch solche bis mehr als 1000 eV Energie auf. Diese letzteren werden durch ihre Spuren in der Wilsonschen Nebelkammer sichtbar, da sie bereits beobachtbare und ausmeßbare Reichweiten von mehreren Millimetern haben. Sie sind für die Untersuchung energiereicher geladener Teilchen von Bedeutung, da die Dichte ihres Auftretens Rückschlüsse auf die Natur und Energie des auslösenden Teilchens gestattet. [1, 7]

engl.: delta rays *franz.: rayons delta*

Lit.: St. Meyer u. E. v. Schweidler, Radioaktivität, Teubner, Leipzig, 2. Aufl., 1927.

Dematerialisation ist die Vernichtung von Materie

unter Erzeugung von Energie, s. Vernichtungsstrahlung. [7]
engl.: dematerialization
franz.: dématérialisation

DEMETER. Bezeichnung für den in der britischen Reaktor-Versuchsstation *Dounreay im Bau befindlichen Schwerwasser-Materialprüfreaktor. Dritter britischer Reaktor des Typs *DIDO. Ursprünglich PLUTO-2 benannt nach dem gleichartigen Materialprüfreaktor *PLUTO in *Harwell. Wärmeleistung 10 0000 kW, Brennstoff Uran auf 90 % U-235 (ca. 2,5 kg) angereichert, Moderator und Kühlmittel D_2O. (Name aus *Deuterium-moderatet Materials Testing Reactor*, sowie wegen der mythologischen Assoziation zu PLUTO). [24]

denaturieren, s. Nachtrag.

Dendrit. Ein aus der Schmelze entstandener Kristall, der nicht in geschlossener Form, sondern als verästeltes Gebilde gewachsen ist. Die kristallographische Orientierung ist jedoch in allen Verzweigungen dieselbe. [4]
engl.: dendrite
franz.: dendrite

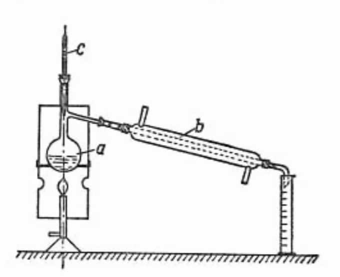
Densitometer, Gerät zur Messung der Schwärzung von photographischen Schichten. Zur Ausmessung der Filmplaketten für den Strahlenschutz wird meist eine kompensierte Meßeinrichtung benutzt. Das Licht einer Lichtquelle fällt auf zwei Photozellen. In den Lichtweg zu einer Zelle wird die zu messende Schicht gebracht. Anzeige der Differenz beider Zellen (nach Verstärkung) am besten auf logarithmischer Skala. Bei anderen Ausführungsformen wird eine geeichte Blende zur Regelung in den zweiten Weg gebracht und auf gleiche Lichtschwächung geregelt. [6]
engl.: densitometer
franz.: densitomètre

Derby, s. Regulus.

Desorption, Wiederbelebung eines Sorptivs, s. Adsorption.
engl.: desorption *franz.: désorption*

Destillation ist nach DIN 7052 die Verdampfung einer Flüssigkeit mit nachfolgender Kondensation des

Dampfes zum D e s t i l l a t. Die e i n f a c h e D. ist zur Trennung von Gemischen nur dann geeignet, wenn die Dampfdrücke der Komponenten sehr verschieden sind (Abtrennung hochsiedender Bestandteile oder fester Beimengungen; das letztere Verfahren wird in der Technik meist *Eindampfen genannt).
Die Substanz mit dem höheren Dampfdruck reichert sich jeweils in der Dampfphase an, bei Substanzen mit eng benachbartem Dampfdruck muß man die Verdampfung mehrstufig durchführen (fraktionierte D.) oder sie oftmals wiederholen (*Rektifikation). Das erste wird technisch in Destillationskolonnen mit Siedeaufsätzen und mehrstufigen Glockenböden (partieller Rückfluß des reinen Kondensates in die Glockenböden) erreicht.
Die D. eignet sich zur E n t a k t i v i e r u n g (Dekontamination) von radioaktiven Abwässern, man wendet sie zur Entaktivierung hochradioaktiver Abfall-Lösungen, vor allen Dingen bei der Anwesenheit langlebiger Spaltprodukte an. Es empfiehlt sich hierbei die



D. in mehreren Stufen durchzuführen. Als Konstruktionsmaterial haben sich Edelstahl, Zirkon, Titan, Monel bewährt. Bei Anwesenheit von Jod und Ruthenium muß eine p_H-Steuerung der Mutterlauge im Destilliergefäß vorgesehen werden.
D. eignet sich ebenfalls zur partiellen E n t g i f t u n g von neutronenbestrahltem U r a n von den gleichzeitig anwesenden Spaltprodukten. Die gasförmigen und die niedrig siedenden Bestandteile Xe, Kr, Rb, Sr, Cs, Ba, J, Sn, Cd und Sb können teilweise durch Erhitzen des

Urans auf hohe Temperaturen (über 1300 °C) abdestilliert werden.

Ferner verwendet man die D. gelegentlich zur partiellen Trennung des Plutoniums vom Uran bei Temperaturen bis zu 2000 °C, da Pu einen höheren Dampfdruck als Uran (10^{-4} atm für Pu gegenüber $8 \cdot 10^{-7}$ atm für Uran bei 1680 °C) besitzt.

D. zur Trennung von Isotopen. Der Trennfaktor bei der D. eines Isotopengemisches ist durch das Verhältnis der Dampfdrucke gegeben: $q = p_l/p_S$. Die Komponente mit dem höheren Dampfdruck geht bevorzugt in das Destillat; im Rückstand reichert sich die weniger flüchtige Komponente an. Wird eine Lösung vom Ausgangsvolumen V_0 bis auf das Endvolumen V unter dauernder Aufrechterhaltung des Gleichgewichts zwischen Dampf und Flüssigkeit eindestilliert, so gilt für die Anfangs- und Endkonzentrationen:

$$\frac{[L_0]}{[L]}\left(\frac{[S]}{[S_0]}\right)^q = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{q-1}$$

(Rayleighsche Formel). [2, 14, 22]

engl.: distillation

franz.: distillation

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. – E. Kirschbaum, Destillier- und Rektifiziertechnik, 2. Aufl., Berlin, 1950.

Destillation, fraktionierte. Eine Destillation, bei der das Destillat bei verschiedenen Temperaturen getrennt aufgesammelt werden kann. [18]

engl.: fractionated distillation

franz.: distillation fractionnée

Deuterium, s. Wasserstoff, schwerer.

engl.: deuterium

franz.: deutérium

Deuteron, der Kern des Atoms des schweren Wasserstoffs oder Deuteriums. Es ist nächst dem gewöhnlichen Wasserstoffkern, dem Proton, der einfachste Atomkern und besteht aus einem Proton und einem Neutron. Die Bindungsenergie ist abnorm klein, nämlich nur 2,2 MeV; das D. zerfällt daher bei einem heftigen Aufprall auf einen anderen Atomkern leicht in seine beiden Bestandteile. Damit hängt die große Wirksamkeit von Deuteronen-Strahlen für Kernumwandlungen zu-

sammen, die meistens zu (d, n)- oder (d, p)-Reaktionen führen.

Die Masse des D. ist 2,01419 Masseneinheiten oder $3,3433 \cdot 10^{-24}$ g, sein Spin ist 1, sein magnetisches Moment 0,8574 Kernmagnetonen, sein elektrisches Quadrupolmoment $2,77 \cdot 10^{-27}$ cm². [1]

engl.: deuteron *franz.: deuton, deutéron*

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Deutsche Atomkommission. Von der Bundesregierung im Dezember 1955 berufenes Gremium aus 25 Mitgliedern, konstituiert 26. Januar 1956. Vorsitzender: der Bundesminister für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft. Mehrere Fachkommissionen mit verschiedenen Arbeitskreisen usw. Aufgabe: nur beratende Funktion für den Atomminister. [24]

Dewindtit. Gelbes, sekundäres, bleihaltiges Uranmineral mit ca. 56 % UO_3-Gehalt. [24]

engl.: dewindtit *franz.: dewindtite*

Dezimalzähler, s. Untersetzer.

engl.: decade scaler, scale of ten circuit

franz.: compteur décimal

Diagonalelement ist eine Zahl aus der Hauptdiagonale einer Matrix. [7]

engl.: diagonal element, franz.: élément de la diagonale

Diagonalmatrix ist eine *Matrix, die von 0 verschiedene Elemente nur in der Diagonale hat: $a_{ik} = 0$, wenn nicht $i = k$ ist. Eine dreireihige D. sieht demnach so aus:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix}$$

Die a_{ii} sind beliebige Zahlen. [7]

engl.: diagonal matrix *franz.: matrice diagonale*

Diamagnetismus eines Plasmas, s. Plasma.

engl.: diamagnetism *franz.: diamagnétisme*

Diamantstruktur. Eine *Kristallstruktur des kubischen Systems, die durch Ineinanderstellung zweier kubisch flächenzentrierter Gitter beschrieben werden kann. Silizium, Germanium und das graue Zinn kristallisieren in D. [4]

engl.: diamond structure

franz.: structure type diamant

Diathese, hämorrhagische. Unter der h. D. versteht man die Verminderung der Blutplättchenzahl und damit verbundene Störung des Blutgerinnungssystems, gekennzeichnet durch Verlängerung der Blutungszeit, Schädigung der Blutgefäßwände und damit in Zusammenhang stehend punktförmige oder flächenförmige Blutungen in der Haut und den Organen, z. B. als Folge einer Strahleneinwirkung. [28]
engl.: haemorrhagic diathesis
franz.: syndrome purpurique

Diäthyläther ($C_4H_{10}O$) wird unverdünnt als Extraktionsmittel von Uran aus Erzrückständen benutzt. [22]
engl.: diethylether *franz.: diéthyléther*

Dibutylcarbitol, s. Carbitol.

Dibutylphosphat, s. TBP.

Dichlordiäthyläther wird als Extraktionsmittel von Eisenchlorid aus salzsaurer wäßriger Lösung verwendet, vor allen Dingen bei der Reindarstellung von Fe-59 und seiner Trennung von Co-60-Spuren. [22]
engl.: dichlordiethylether
franz.: dichlorediéthyléther

Dichtebestimmung stark radioaktiver Lösungen, wie sie bei Aufbereitungsprozessen anfallen, wird mittels der „Tröpfchen-Fallmethode" *(engl.: falling drop specific densimeter method)* durchgeführt. Man mißt die Zeit, die ein kalibriertes, definiertes Tröpfchen zum Durchfallen einer definierten Fallstrecke in einem definierten organischen, in der Tröpfchensubstanz unlösbaren Mittel benötigt und bestimmt daraus die Dichte der Lösung, aus der das Tröpfchen besteht. Bei definierter Tröpfchengröße gilt folgende Beziehung:

$$K \cdot \frac{1}{2} \varrho_1 v^2 = (\varrho_1 - \varrho_2) g h$$

(ϱ_1 Dichte der zu messenden Flüssigkeit, ϱ_2 Dichte des Vergleichsmediums, K eine Funktion der Tröpfchengröße, Viskosität der Phasen usw., v Fallgeschwindigkeit des Tröpfchens, h Fallhöhe, g Erdbeschleunigung).
Neben der oben erwähnten Methode wird häufig auch

die Westphalsche Dichtewaage angewandt. Man mißt die Gewichtsabnahme eines definierten Festkörpers, die dieser nach Eintauchen in die Versuchslösung durch den Auftrieb erhält (Archimedisches Prinzip).

Dickenmessung mit Betareflexion

D. zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Isotopen. Die Methode der D. ist auf Flüssigkeiten (Pyknometer, Schwimmermethode) und auf Gase (Gaswaage) anwendbar. Sie wird häufig für die Messung des D_2O-Gehaltes in Wasser angewendet. [14, 22]
engl.: densimetry
franz.: détermination de densité

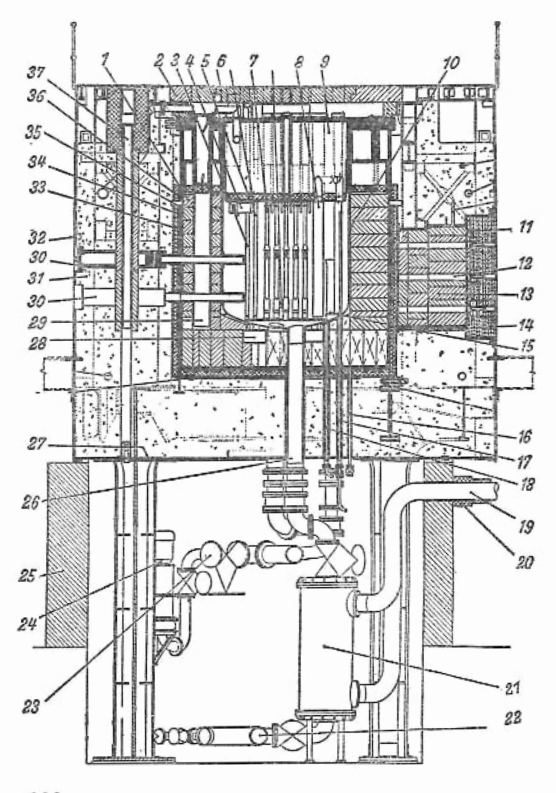
Dickenmessung mit Betareflexion bedient sich der Tatsache, daß Reflektoren unterhalb einer bestimmten Rückdiffusionsdicke einen dickenabhängigen Reflexionskoeffizienten besitzen, s. Betarückstreuung. Für diese Art der D. wurden *Betareflexionssonden entwickelt, in denen Strahlungsdetektor und Betastrahler zu einem einzigen Meßkopf vereinigt sind. Die Betareflexion ist u. a. von Röntgen-Bremsstrahlung begleitet, die von der Ordnungszahl von Schicht und Unterlage abhängt. Durch entsprechende Filterung der reflektierten Strahlung ist es daher möglich, die Empfindlichkeit des Verfahrens und seinen Anwendungsbereich der jeweiligen Aufgabe anzupassen.

Kenndaten des Verfahrens:

Anwendungsbereich:	a) für freitragende Schichten b) für Schichten auf Unterlagen mit unterschiedlicher chemischer Ordnungszahl
Meßbereich:	0,1 bis 150 mg/cm² Flächengewicht
Meßgenauigkeit:	2 bis 3 %
Meßart:	berührungs- und zerstörungsfrei
radioaktiv. Strahler:	^{35}S : 0,1 bis 2 mg/cm² ^{147}Pm: 0,7 bis 7 mg/cm² ^{91}Y : 7 bis 70 mg/cm² ^{90}Sr : 10 bis 150 mg/cm².

Dido Die D. eignet sich besonders für Registrierung und Regelung. [16]
engl.: thickness control by β-backscattering
franz.: mesure d'épaisseur par réflection bêta

Dido (frühere Bezeichnung E 443) ist ein schwerwasser-gekühlter und -moderierter (D_2O = D(i)DO), thermischer, heterogener Forschungs- und Prüfreaktor mit hochangereichertem Uran (>90 %) als Brennstoff. Er steht in Harwell, England, und ist das englische Gegenstück zum amerikanischen Schwerwasserreaktor *CP 5. In Betrieb seit 7. Nov. 1956. Wie CP 5 besitzt



auch D. einen hohen thermischen Fluß (10^{14} n/cm^2 s). Dido
Die Abb. zeigt den Reaktor im Schnitt. Der Reaktorkern besteht aus 25 Brennstoffelementen, die annähernd einen Zylinder von 86 cm Durchmesser und 60 cm Höhe ausfüllen. Die Brennstoffelemente sind vom MTR-Typ (mit je neun Brennstoffplatten (Gesamtmenge 2,5 kg U-235). An den aktiven Teil eines Brennstoffelementes ist unten ein Einlaufstutzen angesetzt, durch den das schwere Wasser zur Kühlung eintritt. Oberhalb des aktiven Teils tritt es seitlich aus, um nunmehr noch als Moderator und Reflektor zu wirken. Nach oben laufen die Brennstoffelemente in Halterungsschäfte aus (Gesamtlänge der Elemente 1,72 m, Querschnitt quadratisch, Kantenlänge 7,4 cm). Das Ganze steckt in einem Al-Tank von 2 m Durchmesser (Gesamtmenge D_2O etwa 10 t, einschließlich Kühlkreislauf). Den Al-Tank umgibt der etwa 61 cm dicke äußere Reflektor aus Graphitziegeln, eine dünne Pb-Schicht, ein Borfutter und ein weiterer doppelwandiger Tank aus Stahl mit Pb-Füllung zwischen den Wänden. Den Abschluß nach außen bildet der im Mittel etwa 1,5 m dicke Schwerbetonmantel sowie eine Stahlplatte, die dem ganzen Reaktor die Gestalt eines gleichseitigen 10-Ecks von 6,7 m Durchmesser (flache Seiten) und 5,7 m Höhe geben.

---

1 Graphitreflektor
2 Deckel (fester Teil)
3 Vertikale Experimentierkanäle
4 Kontrollstab
5 Sicherheitsstab
6 Deckel (beweglicher Teil)
7 Brennstoffelement
8 Vertikale Experimentierkanäle
9 Oberer Schild
10 Aluminiumtank
11 Borschicht der thermischen Säule
12 Thermische Säule
13 Graphitreflektor der thermischen Säule
14 Kühlschlangen für thermische Säule
15 D_2O-Auslaß
16 Stahltank-Ablaßrohr
17 D_2O-Überlauf
18 Al-Tank-Ablaßrohr
19 Kühlwasserrohre
20 Blei-Abschirmung
21 D_2O-Kühler
22 D_2O-Eintritt in Kühler
23 D_2O-Austritt aus Kühler
24 D_2O-Pumpe
25 Betonschild
26 D_2O-Einlaß
27 Bodenplatten
28 Horizontale Experimentierkanäle
29 Vertikale Experimentierkanäle
30 Experimentierkanäle
31 Betonschild
32 Äußere Stahlhülle
33 Stahltank
34 Borschicht an Stahltankwand
35 Blei-Zwischenschicht
36 Bleischild mit Kühlschlangen
37 Lagerung abgebrannter Stäbe

Steuerung des Reaktors: Die Grobregelung erfolgt durch sechs Cd-Plattenelemente vom Signalarmtyp (147 cm Länge), die Feinregelung durch einen Cd-Zylinder. Als Sicherheitsstäbe dienen zwei weitere Cd-Zylinder, dazu kann zur Sicherheitsabschaltung der D_2O-Spiegel auf ein bestimmtes Niveau erniedrigt werden, was einer Verschlechterung der Neutronenreflexion gleichkommt. Die insgesamt erzeugte Wärme (10 MW) wird in mehreren Wärmetauschern an leichtes Wasser abgegeben. Der thermische Schild besteht aus Bor- und Blei-Platten und wird durch leichtes Wasser gekühlt. Über dem D_2O-Spiegel befindet sich eine Helium-Schutzgasschicht, die zur Verdünnung des entstehenden Knallgases und zur Verhinderung von Luft- und damit Luftfeuchtigkeitseinbrüchen (H_2O) dient. Im Falle eines unvorgesehenen D_2O-Verlustes aus dem Reaktortank ist eine Heliumkühlung für die Brennstoffelemente vorgesehen. [25, 24]

Lit.: Grout u. Fenning, Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 2, S. 449, Genf, 1955. – Fenning, Progr. in Nuclear Energy, Ser. II, Vol. 1, S. 271, Pergamon Press, London, 1956. – Nuclear Engineering, Vol. 2, Heft 10, S. 15, 1957.

Differential-Blutbild, s. Blutbild.
engl.: haematologic state
franz.: formule sanguine développé

Differenziergerät bei A n a l o g r e c h n e r n ist die Umkehrung eines Integrators, s. Analogie-Rechenmaschine,
bei R e a k t o r b e d i e n u n g : Hilfsmittel zur laufenden Bildung des Meßwertes der Geschwindigkeit von Leistungs- oder Temperaturänderungen. Es werden im allgemeinen elektronische D. mit eingeprägten Eingangsspannungen und Ausgangsstromsignalen verwendet. Die Hauptanwendung der D. besteht in der Dämpfung automatischer Start- und Regelanlagen. In Verbindung mit logarithmischen Verstärkern dienen sie außerdem zur Messung der *Reaktorperiode. [9]
engl.: differentiator *franz.: dérivateur*

Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw-Hill, New York, 1955. – G. A. Korn, T. M. Korn, Electronic Analog Computers, McGraw-Hill, New York, 1956.

Differenzverstärker: bei der Regelung des Reaktors und im Sicherheitssystem häufig benutzter Typ von *Übertragern zur ausschließlichen Übertragung der

Differenz zweier unabhängiger Eingangsgrößen. Die zumeist elektronischen oder elektromechanischen D. lassen sich nach der Form der Übertragungsfunktion in a) stetige und b) unstetige D. einteilen, ferner nach der Art der elektrischen Verknüpfung in solche c) mit und d) ohne galvanische Kopplung. Die wichtigsten Ausführungsformen sind 1. Elektronenröhren-Gleichspannungs-D. mit getrennten Eingangsgittern (Typ ac), 2. Magnetverstärker mit zwei getrennten Steuerwicklungen (Typ ad), 3. wie 1. mit Kippschaltungen (Typ bc), 4. wie 2. mit Kippschaltungen oder elektromechanische Differentialrelais (Typ bd). Die Anwendung der D. bei der Reaktorsteuerung wird ebensosehr durch die Schnelligkeit der Übertragung und die Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb wie durch die Meßgenauigkeit und Empfindlichkeit bestimmt. Eine feste Zuordnung der verschiedenen D.-Typen zu bestimmten Aufgaben innerhalb der Meß- und Steueranlage von Reaktoren läßt sich zur Zeit nicht feststellen. [9]
engl.: difference amplifier, comparator

Lit.: G. A. Korn, T. M. Korn, Electronic Analog Computers, McGraw-Hill, New York, 1956.

Diffusion ist ein einem Konzentrationsgefälle folgender Ausgleichsvorgang, durch die Wärmebewegung der Moleküle hervorgerufen und i. a. sehr langsam verlaufend, verwandt mit Osmose und Dialyse. Die D. ist durch die Anwendung verfahrenstechnischer Kunstgriffe praktisch ausnutzbar, z. B. durch die *Thermodiffusion oder durch Anwendung von Membranen, von denen in den Diffusionstrennanlagen zur Isotopenanreicherung, vor allem des Uranisotops $^{235}_{92}U$, Gebrauch gemacht wird. In sehr viele Prozesse der Verbrauchsgüterindustrie spielt die Diffusion hinein (Trocknung, Rektifikation, Adsorption, Extraktion u. a. m.), häufig unter gleichzeitigem *Stoff- und *Wärmeaustausch. Beide Vorgänge zeigen deutliche Analogie: Wärmestrom $q = \lambda (t_2 - t_1)/x$ (kcal/m² h) mit den das Temperaturgefälle bestimmenden Temperaturen t_1 und t_2, der Wärmeleitzahl λ (kcal/m · h · grd) und dem Weg x (m). Analog dazu Stoffstrom bei der D. (I. *Fick-sches Gesetz) $g = D \cdot (c_2 - c_1)/x$ (kg/m² · h) mit der Diffusionszahl D (m²/h) und den Konzentrationen c_1

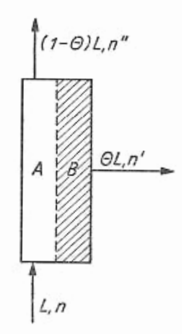
und c_2 (kg/m³). Beide Vorgänge werden durch Grenzschichtbildung beeinflußt, deren Dicke s von der Zähigkeit, der angeströmten Strecke und der Geschwindigkeit abhängt. Bei Turbulenz, gekennzeichnet durch die Reynolds-Zahl Re, wird $x = s$. Zusammenfassung mit λ bzw. D ergibt die Wärmeübergangszahl α (kcal/m² · h · grd) bzw. die Stoffübergangszahl σ (m/h) und damit für den Wärmetransport $q = \alpha \cdot \Delta t$ und für den Stofftransport $g = \sigma \cdot \Delta c$. Das Gesetz von Lewis verknüpft die Wärmeübergangszahl α mit der *Verdunstungszahl $\varkappa$ (kg/m² · h) durch die Beziehung $\alpha/\varkappa \approx 0{,}25$, wenn Temperatur- und Konzentrationsfelder bei erzwungener Strömung ähnlich sind.

Bei der D. eines Gasgemisches aus gleichen Molen zweier Gase mit verschiedenen Molekülmassen $\mu_1 > \mu_2$ durch eine Trennwand (Membran) werden infolge der höheren mittleren Molekülgeschwindigkeit v_2 des leichteren Gases (wegen $\overline{\mu v^2}/2 = 3/2\, k\, T$ mit der Boltzmann-Konstanten k und der absoluten Temperatur T) mehr leichte Moleküle auf die Membran treffen als schwere. Wenn die Poren der Membran klein sind gegen die mittlere freie Weglänge der Moleküle, wird die durch die Membran strömende Menge des leichteren Gases größer sein als diejenige des schwereren (Voraussetzung ist natürlich die Aufrechterhaltung einer Druckdifferenz zwischen beiden Seiten der Membran mit technischen Mitteln, z. B. durch geeignete Pumpen). Damit wird eine Anreicherung um den Faktor $a = \sqrt{\mu_1/\mu_2}$ (*Anreicherungsfaktor) erzielt. Darauf beruht die Trennung der beiden Uranisotope U-235 und U-238 im gasförmigen Zustand als UF_6 (Uranhexafluorid) bei $T > 323°$ in den technischen Diffusionstrennanlagen (z. B. in Oak Ridge, USA). Hierbei beträgt $a = 1{,}0043$, ist also sehr klein und erfordert die Anwendung vieler Stufen.

Von G. Hertz wurden zwei Verfahren entwickelt, die zu einer weitgehenden Trennung von Isotopen geeignet sind und die Grundlage für die riesigen amerikanischen Gasdiffusionsanlagen bilden, die zur Trennung der Uranisotope verwendet werden. Das erste Verfahren benutzte die D. des gasförmigen Isotopengemisches durch

poröse Tonrohre, das zweite die D. durch Quecksilberdampf, der gleichzeitig den Transport der an- und abgereicherten Fraktionen übernimmt. Bei der D. eines Gases durch ein anderes ist die Trennwirkung um so besser, je schwerer das Trägergas im Verhältnis zum zu trennenden Isotopengemisch ist.

Die amerikanischen Anlagen verwenden die D. des UF_6-Dampfes durch poröse Wände (poröser Nickel, fluorierte Kunststoffe). Das Trennelement ist schematisch in der Abb. dargestellt. Ein Raum A ist von einem



Raume B durch eine poröse Wand getrennt. In A strömen L Mole/sec mit dem Molenbruch n des gewünschten Isotops ein, von denen der Bruchteil Θ nach B diffundiert und abgepumpt wird; der Molenbruch des angereicherten Stromes ist n'. Der verbleibende Bruchteil $1 - \Theta$ ist verarmt; sein Molenbruch ist n''.

Der elementare Trennfaktor des Trennelementes ist

$$\varepsilon = \frac{n'(1-n)}{n(1-n')} - 1 = \left(\sqrt{\frac{M_2}{M_1}} - 1\right) \left(1 - \frac{P_B}{P_A}\right) \frac{1-\Theta}{\Theta} \ln \frac{1}{1-\Theta}$$

(M_2, M_1 = Molekulargewichte des schweren bzw. leichten Isotops, P_B, P_A = Druck im Raum B bzw. A).

Die Vervielfachung der sehr geringen elementaren Konzentrationsverschiebung erfolgt durch Hintereinanderschalten einer großen Zahl von Trennelementen in Kaskaden.

Eine andere, technisch jedoch weniger gebräuchliche Methode zur Isotopentrennung ist die *Thermodiffusion.

Die Bewegung von Neutronen in einer gasförmigen, festen oder flüssigen Substanz erfolgt analog der der Moleküle in einem Gasvolumen. Demzufolge gelten die Gesetze der Diffusionstheorie einschließlich ihrer Grenzen auch für die Bewegung der Neutronen. Näheres s. Neutronendiffusion.

Mathematische Behandlung des Vorgangs der D. s. Diffusionstheorie, Diffusionsgleichung, Transporttheorie.

Diffusion im Plasma, s. Transporterscheinungen im Plasma. [2, 7, 14]

engl.: diffusion *franz.: diffusion*

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. – W. Walcher, Gastrennung durch Diffusion, Erg. ex. Naturw. 18, S. 175, 1939. – A. Eucken, Lehrbuch der chemischen Physik, Bd. II/1, 3. Aufl., Leipzig, 1948, S. 336. – J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford, 1956.

Diffusion, ambipolare, s. Transporterscheinungen im Plasma.

engl.: ambipolar diffusion

franz.: diffusion ambipolaire

Diffusion, konvektive, zur Trennung von Isotopen. Die Konvektionsdiffusionsmethode verwendet die D. eines gasförmigen Isotopengemisches durch einen strömenden Dampf nach G. Hertz (s. Diffusion). Die Vervielfachung des elementaren Trenneffektes kann nach dem Gegenstromprinzip erfolgen; für die Erzeugung des Zirkulationsstromes sind verschiedene Anordnungen vorgeschlagen worden. [14]

engl.: convection diffusion

franz.: diffusion par convection

Diffusionsgeschwindigkeit, s. Nachtrag.

Diffusionsgleichung, elementare, zeitunabhängige. Das statische Verhalten eines Reaktors wird auf der elementarsten Stufe durch die *Diffusion der thermischen Neutronen (*Eingruppenmodell) beschrieben. Bezeichnet Φ den Neutronenfluß, so gilt

$$D \Delta \Phi - \Sigma_a \Phi + k \cdot \Sigma_a \Phi = 0 . \qquad (1)$$

Zum Verständnis denke man sich diese Gleichung mit einem Volumelement dV multipliziert. Dann bedeutet

der erste Summand den Gewinn, den dieses Volumelement durch die Diffusion hat (Hineinstreuen minus Hinausstreuen). D ist eine charakteristische Konstante, die Diffusionskonstante. Sie ist durch die mittlere freie Weglänge λ (in höheren Theorien durch die *Transportweglänge λ_t) bestimmt:

Diffusionsgleichung, elementare, zeitunabhängige

$$D = \lambda/3 = 1/(3\,\Sigma_s) \tag{2}$$

(Σ_s makroskopischer Streuquerschnitt). Das zweite Glied gibt die Zahl der absorbierten Neutronen, das letzte Glied die Zahl der entstehenden Neutronen an (Σ_a makroskopischer Absorptionsquerschnitt, k Multiplikationsfaktor pro absorbiertes thermisches Neutron). In der Gaskinetik wird die e. z. D. gewöhnlich für die Dichte des diffundierenden Mediums angegeben. Ist n die Zahl der Neutronen im cm^3 ($n = \Phi/v$), so schreibt man statt (1)

$$D'\,\Delta n - \Sigma_a \cdot v \cdot n + k \cdot \Sigma_a v\, n = 0\,. \tag{3}$$

Die Größe v ist dort in die Diffusionskonstante D' hineingezogen, so daß

$$D' = \lambda \cdot v/3 = D \cdot v\,. \tag{4}$$

In der Reaktorstatik rechnet man gewöhnlich mit (1). Die Diffusionskonstante wird nach (2) definiert. Dividiert man (1) durch D, und führt mit

$$L = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}} = \sqrt{\frac{1}{3\,\Sigma_s\,\Sigma_a}} = \sqrt{\frac{\lambda_s\,\lambda_a}{3}} \tag{5}$$

die *Diffusionslänge ein, so entsteht

$$\Delta\Phi + \frac{k-1}{L^2}\,\Phi = 0\,. \tag{6}$$

Für einen nackten homogenen Kugelreaktor z. B. ist die Lösung dieser Gleichung

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \frac{\sin B\,r}{r} \tag{7}$$

wobei

$$B^2 = \frac{k-1}{L^2} \tag{8}$$

Der e. z. D. sind zwei Randbedingungen hinzuzufügen. Die erste fordert, daß $\Phi(0)$ endlich sein muß, die

zweite verlangt, daß am äußeren Rand des homogenen nackten Reaktors vom Radius R der Fluß verschwindet, also

$$\Phi(R) = 0\,,$$

d. h. es muß gleichzeitig

$$B = \pi / R \tag{9}$$

sein. Wenn die Bedingungen (8) und (9) gleichzeitig erfüllt sind, ist der Reaktor kritisch, d. h. dann sind die Größen k, Σ_a, D und R so aufeinander abgestimmt, daß die stationäre Gleichung (1) eine physikalische Aussage darstellt. Die gleichzeitige Befriedigung von (8) und (9) heißt *kritische Gleichung. [7]

engl.: elementary time-independent diffusion equation
franz.: équation élémentaire de diffusion, indépendante du temps

Lit.: F. Cap, Physik und Technik der Atomreaktoren, Springer, Wien, 1957. – R. L. Murray, Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, 1957. – S. Glasstone u. M. C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, van Nostrand, New York, 1952.

Diffusionsgleichung, zeitabhängige. Die Neutronendiffusion wird bei zeitlich veränderlichen Bedingungen von der streng gültigen *Boltzmann-Gleichung beherrscht. Mit Hilfe der *Kugelfunktionsmethode kann man übergehen zur *zeitabhängigen P_1-Approximation. Es ergeben sich dabei Gleichungen von zweiter Ordnung in der Zeit, welche die Ausbildung von Neutronen-Fronten und andere Retardierungs-Erscheinungen beschreiben. Diese Gleichungen müssen bei genauerer Behandlung von zeitabhängigen Problemen in unmittelbarer Nähe der Neutronenquellen benützt werden. Für Gebiete, die von einer (veränderlichen) Quelle einige Transportweglängen entfernt sind (Fernzone), geht die P_1-Approximation über in die gewöhnliche z. D.:

$$\frac{1}{v}\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grd} \Phi) - \Sigma_a \Phi + Q\,.$$

Dabei bedeutet D die Diffusionskonstante und Σ_a den Absorptionsquerschnitt.

Handelt es sich um eine im Ursprung liegende Punktquelle, von der im Zeitpunkt $t = 0$ ein kurzer Stoß von Neutronen ausgeht, so lautet die Lö-

sung der z. D.:

$$\Phi(\mathfrak{r}, t) \sim \frac{1}{[4\pi D v t]^{3/2}} \exp \cdot \left[-\frac{(\mathfrak{r})^2}{4 D v t} - \Sigma_a v t \right] = K_p(\mathfrak{r}, t).$$

Ist die Quelle räumlich verteilt, so kann die Lösung mit Hilfe dieses „Punkt-Kernes“ in der Form

$$\Sigma_a \cdot \Phi(\mathfrak{r}, t) = \int\int \Sigma_a K_p(\mathfrak{r}, \mathfrak{r}', t, t') \cdot Q(\mathfrak{r}', t') \, dV' \, dt'$$

gefunden werden. Analog zu den *Diffusions-Kernen für den stationären Fall, lassen sich auch im zeitabhängigen Fall Diffusionskerne für verschiedene Geometrien angeben. [13]

engl.: time dependent diffusion equation

franz.: équation de diffusion, dépendant de temps

Lit.: A. M. Weinberg and L. C. Noderer, Theory of Neutron Chain Reactions, AECD-4371, 1951.

Diffusions-Kern. Im unendlichen homogenen Medium kann der von einer Einheits-Punktquelle am Ort $\mathfrak{r}'$ erzeugte Neutronenfluß $\Phi(\mathfrak{r})$ leicht zu

$$\Phi(\mathfrak{r}) = \frac{\exp\left[-\sqrt{\frac{\Sigma_a}{D}} \, |\mathfrak{r} - \mathfrak{r}'| \right]}{4\pi D |\mathfrak{r} - \mathfrak{r}'|} = K_p(\mathfrak{r}, \mathfrak{r}')$$

bestimmt werden. Dabei bedeutet D die Diffusionskonstante und Σ_a den Absorptionsquerschnitt. Ist die Quelle räumlich verteilt und $Q(\mathfrak{r})$ ihre Quellstärke (Neutronen pro cm^3 und s), so ergibt sich der entsprechende Fluß durch Integration:

$$\Phi(\mathfrak{r}) = \int Q(\mathfrak{r}') K_p(\mathfrak{r}, \mathfrak{r}') \, dV'.$$

Die Funktion K_p erweist sich dabei als Punkt-D.-K. Man kann D.-K.e auch für andere Geometrien bilden. Die Tabelle auf S. 240 stellt die wichtigsten davon zusammen. Zur Abkürzung wurde $\varkappa^2 = \Sigma_a/D$ gesetzt. Unter K_0 und I_0 sind modifizierte Besselfunktionen zweiter und erster Art zu verstehen. [13]

engl.: diffusion kernel *franz.: noyau de diffusion*

Diffusionskonstante, s. Neutronendiffusion und Diffusionsgleichung, elementare.

engl.: diffusion constant

franz.: constante de diffusion

Geometrie	Bezeichnung	Quellstärke	Diffusionskern
Punkt	$K_p(\mathfrak{r}, \mathfrak{r}')$	1 Neutron/s	$\frac{1}{4\pi D \mid \mathfrak{r} - \mathfrak{r}' \mid} \exp(-\varkappa \mid \mathfrak{r} - \mathfrak{r}' \mid)$
Ebene	$K_e(x, x')$	1 N/cm^2 s	$\frac{1}{2\varkappa D} \exp(-\varkappa \mid x - x' \mid)$
Gerade	$K_g(r, r')$	1 N/cm s	$\frac{1}{2\pi D} K_0(k\varrho)$ $\varrho^2 = r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi' - \varphi)$
Kugelschale	$K_k(r, r')$	1 N pro Schale vom Radius r' und pro s	$\frac{1}{8\pi r r' \varkappa D} (e^{-\varkappa \mid r-r' \mid} - e^{-\varkappa \mid r+r' \mid})$
Zylinderschale	$K_z(r, r')$	1 N pro Schale vom Radius r', pro cm und pro s	$\frac{1}{2\pi D} \cdot \begin{cases} K_0(\varkappa r) I_0(\varkappa r') \ldots r > r' \\ K_0(\varkappa r') I_0(\varkappa r) \ldots r < r' \end{cases}$

Diffusionskühlung, s. Nachtrag.

Diffusionslänge. Neutronen verteilen sich in einem absorbierenden Medium um eine punktförmige Quelle (Quellstärke q) gemäß

$$\Phi(r) = \frac{q \cdot e^{-r/L}}{4\pi D r} . \qquad (1)$$

Die den Abfall der Exponentialfunktion charakterisierende Größe L heißt D. Der Faktor D im Nenner ist die *Diffusionskonstante. Berechnet man das Quadrat des mittleren Abstandes des Absorptionsortes vom Quellort, so findet man, daß

$$\overline{r^2} = 6 L^2 . \qquad (2)$$

L ist eine charakteristische Größe in der *Diffusionsgleichung, s. insbesondere Diffusionsgleichung, elementare. Wie dort gezeigt wird, hängt L von Streu- und Absorptionsquerschnitten ab gemäß

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} = \frac{1}{3\,\Sigma_s\,\Sigma_a} = \frac{\lambda_s\,\lambda_a}{3} . \qquad (3)$$

Σ_s und λ_s sind gegebenenfalls durch die Transportgrößen Σ_t und λ_t zu ersetzen. [7]
engl.: diffusion length
franz.: longueur de diffusion

Diffusionsnäherung, die Berechnung der Neutronendiffusion mit Hilfe der unter gewissen Bedingungen anwendbaren *Diffusionstheorie, an Stelle der streng gültigen *Transporttheorie. [13]
engl.: diffusion approximation
franz.: approximation de diffusion

Diffusionstheorie, näherungsweise gültige Theorie zur Beschreibung des Phänomens der Diffusion. Dieses wird in der *Transporttheorie streng behandelt, indem außer Ort, Zeit und Energie auch die Flugrichtung der Teilchen (Neutronen) berücksichtigt wird. Ist keine der möglichen Flugrichtungen vor den anderen stark bevorzugt (Quasi-Isotropie), so kann man unter gewissen Bedingungen die Neutronendiffusion mit Hilfe der D. beschreiben, welche die Flugrichtung der Neutronen unberücksichtigt läßt und mit dem skalaren Neutronenfluß arbeitet. Der

Übergang von der Transporttheorie zur D. kann auf verschiedene Weise vollzogen werden.

Wenn man z. B. die von einer Punktquelle bedingte Neutronenverteilung in einem homogenen, isotrop streuenden Medium (mit energieunabhängigem Streuquerschnitt) nach der Transporttheorie bestimmt, so ergibt sich der Neutronenfluß in der Form

$$\Phi(\mathfrak{r}) = \Phi_{tr} + \Phi_{as},$$

wobei der „asymptotische Fluß" Φ_{as} der Gleichung

$$D \cdot \Delta\Phi_{as} - \Sigma_a \Phi_{as} = 0$$

gehorcht. Dabei bedeutet D die Diffusionskonstante und Σ_a den Absorptionsquerschnitt. Mehrere Transportweglängen entfernt von Quellen, Grenzen oder Rändern gegen das Vakuum ist die Winkelverteilung der Neutronen annähernd isotrop und es ist $\Phi_{tr} \ll \Phi_{as}$. An Stelle der strengen *Transportgleichung kann man in diesen Gebieten des Mediums die obenstehende *Diffusionsgleichung verwenden.

Die D. wird überall zu schlechten Ergebnissen führen, wo die oben genannten Bedingungen nicht zutreffen. In der Umgebung von Quellen unterschätzt sie die Absorption und es muß daher eine *Quellkorrektur angebracht werden. An Rändern gegen das Vakuum ist die aus der Transporttheorie gefolgerte *Extrapolationslänge zu verwenden. Schließlich muß im stark absorbierenden Medium berücksichtigt werden, daß in größerer Entfernung von einer Quelle die unmittelbar aus der Richtung zur Quelle kommenden Neutronen bevorzugt vertreten sind, und daß dadurch auch im Innern eines Mediums weit von der Quelle die D. unzureichend wird.

Gewöhnlich wird der Übergang zur D. über die P_1-Approximation der *Boltzmann-Gleichung (s. Kugelfunktionsmethode) oder über die *Integralgleichung der Neutronendiffusion vollzogen.

Bei zeitabhängigen Diffusionsproblemen ist ein weiterer Umstand zu berücksichtigen. Die P_1-Approximation führt auf eine Differentialgleichung vom Typus der *Telegraphengleichung, die in der Zeit von zweiter Ordnung ist. Nur in hinreichend großer Entfernung von einer zeitlich veränderlichen Neutronen-

quelle geht diese Gleichung in die gewöhnliche Diffusionsgleichung über, welche in der Zeit von erster Ordnung ist. [13]

engl.: diffusion theory *franz.: théorie de diffusion*

Lit.: B. Davison, Neutron Transport Theory, Clarendon Press, Oxford, 1957.

Diffusionsweglänge, mittlere freie, eine für ein Diffusions-Medium charakteristische Länge, definiert durch

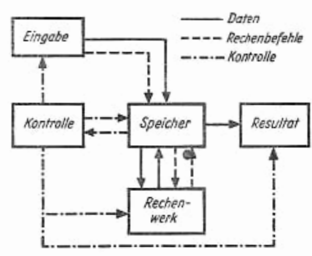
$$\lambda_d = \frac{1}{\Sigma_a + \Sigma_s(1 - \overline{\mu_0})} = \frac{1}{\Sigma - \Sigma_s \overline{\mu_0}},$$

wobei Σ den totalen makroskopischen Wirkungsquerschnitt, Σ_s den Streuquerschnitt und Σ_a den Absorptionsquerschnitt bedeuten, $\overline{\mu_0}$ ist der mittlere cosinus des Streuwinkels. Ist das Medium ein schwacher Absorber, so daß man $\Sigma_a \ll \Sigma_s$ setzen kann, so geht die m. f. D. über in die mittlere freie *Transportweglänge. Die m. f. D. tritt im allgemeinen *F i c k schen Gesetz auf. [13]

engl.: diffusion mean free path

franz.: libre parcours moyen de diffusion

Digitalrechenmaschine. Gründlichere Reaktorberechnungen erfordern den Einsatz von leistungsfähigen elektronischen Rechenmaschinen. Man unterscheidet zwei Grundtypen, die D. und den *Analogie-Rechner. Die D.n sind Stellenwert-Rechner wie die gewöhnliche Handrechenmaschinen, doch sind sie diesen



Digitalrechenmaschine

an Geschwindigkeit und Speichermöglichkeit weit überlegen. Die Zähleinheit wird durch einen elektrischen Impuls (bzw. durch das Ausbleiben eines Impul-

ses) gebildet. Aus diesem Grunde arbeiten D.n vielfach nicht mit dem dekadischen System, sondern übersetzen die dekadischen Eingangs-Daten automatisch in ein Binär- oder Biquinär-System. Die Eingangsdaten werden der Maschine meist in Form von Lochkarten, Lochstreifen, Magnetbändern usf. übermittelt, die in einer Abfühlvorrichtung abgetastet und dem Speicher zugeleitet werden (s. Abb.). Bei mittelschnellen Maschinen besteht der Speicher aus einer rasch rotierenden Stahltrommel, auf die die Impulsfolge aufmagnetisiert wird. Schnelle Maschinen verwenden als Speicher u. a. Matrizen mit Ferrit-Kernen, die magnetisiert werden können. Eine Kontrolleinrichtung sorgt dafür, daß die Daten und Rechenbefehle dem Rechenwerk in der richtigen Reihenfolge zugeführt werden. Ist die Rechnung durchgeführt, so wird das Resultat in einem Ergebniswerk in Form von Lochkarten oder aber bereits dekadisch in Tabellenform gedruckt ausgewiesen. Die Leistungsfähigkeit einer D. hängt einerseits von der Rechengeschwindigkeit (arithmetrische Operationen/s), andererseits von der Speicherfähigkeit ab. Die größte Elastizität weisen speicherprogrammierte Maschinen auf, die nicht nur Daten und Befehle speichern, sondern mit einem Teil ihres umfangreichen Speichers zur Aufnahme von einzelnen komplizierteren Operationen, z. B. Wurzelziehen, Potenzieren, Logarithmieren usf. (sog. „Unterroutinen") fähig sind. Die Zeitersparnis gegenüber der Arbeit mit Handrechenmaschinen ist außerordentlich, doch muß ein gewisser

Sachgebiet	Programme
Reaktortechnik	8
Reaktorphysik	36
Abschirmung	10
Kurzzeitverhalten	7
Langzeitverhalten	8
Diffusionstheorie	61
Transporttheorie	10

Typ	Operationen/s Dezimalpunkt fix	Operationen/s Dezimalpunkt beweglich	Kosten: Miete ($/Monat)	Kosten: Kauf ($)	Kosten: pro Operation ($)
Tischrechenmaschine	$2,5 \cdot 10^{-2}$			200	$3 \cdot 10^{-2}$
IBM 650, Datatron	10^{2}	15	$4 \cdot 10^{3}$	$2 \cdot 10^{5}$	$6 \cdot 10^{-5}$
UNIVAC	$5 \cdot 10^{2}$	10^{2}	$2 \cdot 10^{4}$	10^{6}	$6 \cdot 10^{-5}$
IBM 701, UNIVAC 1103	$2 \cdot 10^{3}$	10^{2}	$2 \cdot 10^{4}$	10^{6}	$1,5 \cdot 10^{-5}$
IBM 704, 709, UNIVAC 1103 A	$6 \cdot 10^{3}$	$6 \cdot 10^{3}$	$4 \cdot 10^{4}$	$2 \cdot 10^{6}$	10^{-5}
LARC	10^{5}	10^{5}	10^{5}	$3,5 \cdot 10^{6}$	10^{-6}
STRETCH	10^{6}	10^{6}	$2 \cdot 10^{5}$	$6 \cdot 10^{6}$	$2 \cdot 10^{-7}$

Zeitraum für das Programmieren der Aufgabe und die Korrektur dieses Programms veranschlagt werden.
Vielfach kann man sich auf ausgearbeitete Programme stützen. Es gibt bereits kleine „Bibliotheken" von Reaktor-Rechenprogrammen wie die Liste auf S. 244 veranschaulicht.
Die Tabelle auf S. 245 zeigt die Rechengeschwindigkeit und die Kosten von einigen der wichtigsten handelsüblichen Typen von Digitalrechnern. [13]
engl.: digital computer
franz.: calculateur digitale
Lit.: Sonderheft Nucleonics 15, No. 5 (Mai 1957). Dort findet sich auch Literatur über Rechenprogramme.

DIMPLE. Abk. aus Deuterium Moderated Pile Low Energy für den ersten britischen Schwerwasser-Forschungs- und Entwicklungsreaktor in *Harwell: Uran, Schweres Wasser als Moderator, sehr niedrige Leistung. In Betrieb seit August 1954. [24]

DIN-Empfindlichkeit ε, Maß für die Empfindlichkeit photographischer Schichten. Gibt den reziproken Wert der Belichtung (Luxsekunden) an, die unter genormten Entwicklungsbedingungen eine logarithmische Schwärzung von 0,1 über dem Plattenschleier ergibt.
Angenähert gilt: Exposition E für 0,1 Schwärzung

$$E = 0{,}275 \cdot 10^{-\varepsilon} \text{ Luxsekunden.} \qquad [6]$$

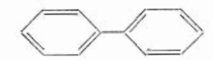
engl.: DIN-sensitivity
franz.: Sensibilité DIN

Dingot (= direct ingot), s. Regulus.

Dioctylpyrophosphorige Säure, s. OPPA.

DIPC, amerikanische Abk. für das Extraktionsmittel Diisopropylcarbinol. Es wird zur Trennung von Uran von den Spaltprodukten aus wäßriger Lösung bei Anwesenheit von $Al(NO_3)_2$ als Salzzuschlag benutzt. [22]

Diphenyl, achromatischer Kohlenwasserstoff aus der *Polyphenylreihe. D. ist das höhere Homologe von



Benzol. Die Strahlenbeständigkeit ist sehr gut, es wurde ein $G_{H_2} = 0{,}008$ gemessen (s. G-Wert). Der Schmelzpunkt liegt bei 70 °C. Bei normaler Temperatur ist ein kaum meßbarer Dampfdruck vorhanden, der bei 400 °C

nur 17 atm erreicht. D. fällt als Nebenprodukt in der chemischen Industrie in kleineren Mengen an. [18]
engl.: di-phenyl
franz.: diphényl

Diphyl, Handelsname (Bayer) für ein eutektisches Gemisch von Diphenyl ($C_6H_5-C_6H_5$) und Diphenyloxyd ($C_6H_5-O-C_6H_5$). In den USA als „Dowtherm A" erhältlich. Der Schmelzpunkt liegt bei 12,3 °C. D. wird häufig als Wärmeübertragungsmittel benutzt, weil es thermisch sehr stabil ist. Auch gegenüber der im Reaktor auftretenden Strahlung ist es verhältnismäßig resistent, weshalb es als organischer Moderator Verwendung finden kann. [20]

diploid, svw. zweifach, den doppelten Chromosomensatz besitzend. Das trifft für sämtliche Körperzellen mit Ausnahme der Keimzellen zu. S. Chromosomen. [28]
engl.: diploid
franz.: diploïde

Dipol. 1. In der allgemeinen Bedeutung: a) elektrischer D. Ein Ladungssystem, das aus einer positiven Ladung $+e$ und einer gegen sie um eine kleine Strecke l verschobenen negativen Ladung $-e$ gebildet wird, heißt elektrischer D. In einem Punkt A, der die Entfernungen r_1 und r_2 von den beiden Ladungen hat (Abb. 1), herrscht das Potential

$$\varphi = e\left(\frac{r_1}{l} - \frac{r_2}{l}\right) = e\,\frac{r_2 - r_1}{r_1\,r_2}.$$

Ist r der Abstand des Ladungsschwerpunktes O von A und ist dieser groß gegenüber dem Abstand l der Ladungen, so gilt in guter Näherung

$$r_1\,r_2 = r^2,\, r_2 - r_1 = l\cos\vartheta\,,$$

wobei ϑ der Winkel ist, den die Dipolrichtung mit dem Radiusvektor OA bildet. Bezeichnet man das Produkt $e\,l$ als das elektrische Moment m des D.s, so ist sein Potential

$$\varphi = \frac{m\cos\vartheta}{r_2}.$$

Es ist nicht mehr kugelsymmetrisch, wie das Potential

einer Ladung, sondern nur noch rotationssymmetrisch um die Dipolachse.

In einem homogenen elektrischen Feld der Feldstärke $\mathfrak{E}$ wirkt auf einen elektrischen D. das Drehmoment

$$M = 2\,e\,E\,\frac{l}{2}\cdot\sin\alpha = m\,E\cdot\sin\alpha$$

bzw. in Vektordarstellung

$$\mathfrak{M} = [\mathfrak{m}\times\mathfrak{E}]\;.$$

Dabei ist α der Winkel zwischen D.-Richtung und Feld. Es stellt den D. parallel zur Feldrichtung, wenn er frei drehbar ist (Abb. 2). Im inhomogenen Feld erfährt der D. außerdem noch eine Kraft in Richtung des Feldanstiegs, da die Kräfte auf die beiden Ladungen verschieden groß sind, und zwar ist

$$P = m\,\frac{\partial E}{\partial x}$$

(Feldanstieg in x-Richtung).

b) Magnetischer D. Ein Kreisstrom und ein stromdurchflossenes Solenoid können als magnetische D. aufgefaßt werden, wenn ihr Magnetfeld in einer Entfernung beobachtet wird, die groß gegen die Abmessungen des stromdurchflossenen Leiters ist. Die magnetischen Feldlinien eines Stromkreises verlaufen

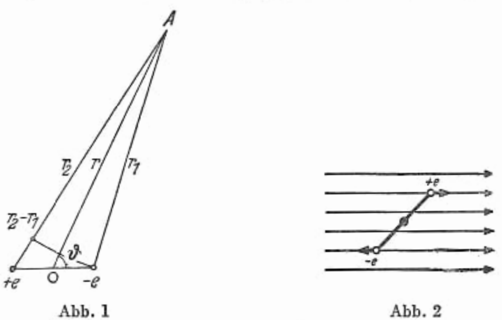


Abb. 1 Abb. 2

in Entfernungen, die groß gegenüber den Dimensionen der Strombahn sind, wie die Feldlinien eines D. vom Moment

$$m = \frac{I}{c}\cdot f\,,$$

wobei l die Stromstärke und f die von dem Kreisstrom begrenzte Fläche ist.
Bei einem geraden Solenoid ist nur noch mit der Zahl N der Windungen zu multiplizieren. Auch jeder permanente Magnet stellt einen magnetischen D. dar. Das Dipolmoment des magnetischen D. wird analog zum elektrischen D. als Produkt von Polstärke und Abstand der Pole definiert.
2. In der Atomphysik. Moleküle, Atome und Kerne stellen häufig elektrische oder magnetische D. dar, d.h. sie besitzen ein elektrisches oder magnetisches Dipolmoment und damit ein Feld, wie es unter 1. beschrieben wurde.
Bei Molekülen ist besonders das elektrische Dipolmoment wichtig. Moleküle, die ein solches konstantes Dipolmoment (Größenordnung 10^{-18} elektrostatische CGS-Einheiten) besitzen, heißen Dipolmoleküle oder polare Moleküle und üben besonders starke Anziehungskräfte aufeinander aus. Die Größe des molekularen Dipolmomentes kann aus der gemessenen Dielektrizitätskonstanten eines Gases oder einer Flüssigkeit errechnet werden. Moleküle und Atome, die von Natur kein elektrisches Dipolmoment haben, erhalten in einem elektrischen Feld ein induziertes Dipolmoment durch Verschiebung des Schwerpunkts der positiven und negativen elektrischen Ladungen.
Bei Atomkernen ist das *Tensorpotential grundlegend für das Zustandekommen der Bindung der Nukleonen. Das Tensorpotential ist im wesentlichen nichts anderes als das Potential eines D.s im Felde eines D.s. Diese D.e sind allerdings weder elektrischer noch magnetischer Natur, sondern D.e im Bereich der *Kernkräfte. [1, 7]
engl.: dipole
franz.: dipôle

Diskriminator. Schaltungsanordnung zur Aussonderung von Impulsen, deren Spitzen bestimmte Grenzen über- oder unterschreiten. Es gibt einstufige D.n, die nur beim Überschreiten eines (einstellbaren) Grenzwertes ansprechen, ferner *Einkanal-D.n, die ansprechen, wenn die Impulshöhe zwischen zwei (einstellbaren) Grenzen liegt, und *Mehrkanal-D.n,

die die Impulse nach ihrer Größe zwischen mehreren Grenzwerten sortieren.

D.n dienen zur Aufnahme von *Impulsspektren.

Beim Einkanal-D. wird eine Diode, Verstärkerröhre oder Transistor durch die Diskriminationsspannung so vorgespannt, daß sie ein Eingangssignal erst nach Überschreiten dieses Spannungswertes weiterleitet. Beim Ein- bzw. Mehrkanal-D. wird die Weiterleitung automatisch gesperrt, wenn auch eine obere Grenzspannung überschritten wird. [6]

engl.: discriminator, pulse height analizer
franz.: discriminateur

Lit.: W. Elmore u. M. Sands, Electronics, New York, 1949. – Siegbahn, Kai, Beta- and Gamma ray Spectroscopy, Interscience Publishers Inc., New York, 1955. – A. B. van Rennes, Pulse amplitude analysis innuclear research. – Nucleonics 10 Nr. 7, 20; 10 Nr. 8, 22; 10 Nr. 9, 32 und 10 Nr. 10, 50 (1952).

Displacement spike, Begriff aus der Theorie der *Strahlenschäden. Bereiche im Metallgitter, die durch Energieaufnahme von einem eindringenden schnellen Teilchen kurzzeitig geschmolzen und deshalb gegenüber dem ursprünglichen Gitter fehlgeordnet sind. S. a. „Thermal spike". [20]

Dissoziation. Zerfall von Molekülen in Ionen oder ungeladene Teilchen. Die D. kann durch thermische, elektrische oder Strahlungsenergie erfolgen. In jedem Falle tritt ein Dissoziations-Gleichgewicht ein, in welchem ebenso viele Moleküle aus den dissoziierten Teilen in der Zeiteinheit wieder zusammentreten, wie neu dissoziieren.

Ein besonders wichtiger Fall der D. tritt ein, wenn Stoffe in gewissen Lösungsmitteln, vor allem Wasser, aufgelöst werden. So dissoziiert z. B. der Kupfersulfatkristall $CuSO_4$ beim Auflösen in Wasser in das doppelt positive Cu^{++}-Ion, und das doppelt negative $(SO_4)^{--}$-Ion. Die Dissoziationsenergie wird hier durch die elektrische Wechselwirkung mit den Dipol-Molekülen (s. Dipol) des Wassers geliefert. Auch hier entsteht ein Dissoziationsgleichgewicht; je höher die Konzentration der Lösung ist, desto geringer wird der Dissoziationsgrad, der Prozentsatz der dissoziierten

Moleküle. Die durch die D. entstandenen Ionen bedingen die elektrische Leitfähigkeit der Lösung. [1, 18]
engl.: dissociation
franz.: dissociation

Divergenz. Die D. (Quelldichte) eines *Vektorfelds $\mathfrak{a}$, dessen Stärke durch die Dichte der Feldlinien dargestellt werde, ist anschaulich gegeben durch die Zahl von Quellpunkten der Feldlinien in der Raumeinheit. Analytischer Ausdruck der D. in cartesischen Koordinaten ist

$$\operatorname{div} \mathfrak{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} .$$

Ähnliche, mit den Komponenten eines Tensors T_{ik} gebildete Ausdrücke werden gleichfalls D.n genannt. Der Fluß $\oint \mathfrak{a} \cdot d\mathfrak{f}$ des Vektors $\mathfrak{a}$ durch die Oberfläche O eines Raumgebiets G ist die Zahl der aus G kommenden und durch O hindurchtretenden Vektorlinien. Dieser ist gleich der Zahl der im Innern von G entspringenden Vektorlinien, d. h. der Quellen. Es gilt also der Gaußsche Satz

$$\oint_O \mathfrak{a} \cdot d\mathfrak{f} = \int_G \operatorname{div} \mathfrak{a} \, dv .$$

engl.: divergence *franz.: divergence* [7]

DL 50, svw. Dosis letalis 50 %. Hierunter versteht man seit den Arbeiten von Trevan (Proc. Roy. Soc. B 101, 483 (1927) jene Dosis eines Stoffes, nach der 50 % des getesteten Materials (Tier oder Pflanze) sterben. Zur genaueren Definition ist anzugeben, in welcher Form der Stoff appliziert wurde und wie lange. Gleichzeitig muß die Beobachtungszeit angegeben werden. So hat sich u. a. eingebürgert, folgendermaßen zu schreiben: DL 50/30, womit man die für 50 % letale Dosis angibt, bei einem Beobachtungszeitraum von 30 Tagen.
Die Berechnung der DL 50 und auch die Bestimmung in einem Versuchsansatz kann sehr verschieden gehandhabt werden. [28]
engl.: lethal dose 50 *franz.: dose létale 50*

Lit.: H. Hosemann, Die Grundlagen der statistischen Methoden für Mediziner und Biologen, Thieme-Verlag, Stuttgart, 1949. – K. Mather, Statistische Analysen in der Biologie, Springer, Wien,

1954. – H. Gebelein u. H. J. Heite, Statistische Urteilsbildung, Springer, Berlin, 1951. – D. J. Finney, Probit Analysis, University Press, Cambridge, 1952.

DMTR = Dounreay Materials Testing Reactor, praktisch identisch mit Pluto. [7]

D-Neutronen sind Neutronen solcher Energie, daß sie von Rhodium, das mit einer Cadmiumfolie bedeckt ist, stark absorbiert werden. Der Ausdruck ist nicht mehr gebräuchlich. [7]
engl.: D-neutrons *franz.: neutrons D*

DNS ist die Abkürzung für Desoxyribonukleinsäuren. Hierunter versteht man Verbindungen zwischen einer organischen Base und dem Zucker Desoxyribose. Während der Zuckeranteil immer konstant ist, können folgende Basen auftreten: Adenin, Guanin, Cytosin, Thymin. Die Verbindung zwischen den beiden Komponenten (Base + Zucker) bezeichnet man als Nukleosid, wird der Zucker mit einem Mol Phosphorsäure verestert, so ist ein Nukleotid entstanden. Nukleotide können zu Polynukleotiden zusammentreten, wobei folgende Struktur gewählt wird:

```
Phosphors. — Desoxyribose — Base
                  |
            Phosphors. — Desoxyribose — Base
                               |
                         Phosphors. — Desoxyribose — Base
                                            |
                                           etc.
```

Desoxyribonukleinsäuren sind Bestandteile des Zellkerns, vor allem besteht das Genmaterial aus ihnen. [28]
engl.: DNA *franz.: DNA*

Lit.: B. Flaschenträger und E. Lehnartz, Physiol. Chemie, die Stoffe, Bd. I. – H. Bredereck, Purin und Pyrimidinverbindungen, hrsg. von B. Flaschenträger u. E. Lehnartz, in Physiol. Chemie, Die Stoffe, Bd. I, S. 796 ff., Springer, Berlin, 1951.

Dollar, s. Cent.

dominant, svw. vorherrschend. Unter Vorherrschen einzelner Erbanlagen versteht man das Überdecken der nicht-dominanten Erbanlagen. [28]
engl.: dominant *franz.: dominant*

Doppelfokusröhre. Bei den D.n sind wahlweise zwei Brennflecke verschiedener Größe einzustellen, je nachdem, welcher der beiden Glühfäden, aus denen die

Kathode besteht, geheizt wird. Es wird dadurch die gute Zeichenschärfe eines sehr kleinen Brennflecks bei Knochenaufnahmen und die höhere Belastbarkeit eines größeren Brennflecks bei Aufnahmen bewegter Organe und bei Aufnahmen am Körperstamm erreicht. [28]
engl.: bifocal tube *franz.: tube à double foyer*

Doppelfokussierung. Um beim *Massenspektrographen an der Stelle der Aufnahme genügende Intensität zu erhalten, muß man die Ionenstrahlen fokussieren, d. h. dafür sorgen, daß Strahlen von Teilchen gleicher spezifischer Ladung, die im Apparat auf verschiedenen Wegen laufen, sich in e i n e m Punkt der photographischen Platte vereinigen. Dies ist auf zweierlei Weise möglich. Einmal kann man Strahlen gleicher Masse, welche vom Ausgangs-Spalt mit gleicher Geschwindigkeit, aber unter etwas verschiedenen Richtungen ausgehen, nachträglich wieder sammeln (*Richtungsfokussierung). Oder man kann dafür sorgen, daß Strahlen gleicher Masse und gleicher ursprünglicher Richtung, die aber nicht alle dieselbe Geschwindigkeit haben, trotzdem in e i n e m Punkt zusammenlaufen (*Geschwindigkeitsfokussierung). Erreicht man gleichzeitig beides, so spricht man von D. Erst die D. hat die Intensität im Massenspektrographen so sehr gesteigert, daß die moderne, äußerst hohe Auflösung möglich wurde. [1]

Lit.: H. Ewald u. H. Hintenberger, Massenspektroskopie, Chemie, Weinheim/Bergstr., 1953.
engl.: double focussing
franz.: double focalisation

Doppelgitter nennt man die Anordnung des Brennstoffs in einer Spaltzone, deren Brennstoffelemente selbst aus einer Reihe von Brennstoffplatten bzw. Brennstoffstäben symmetrisch zusammengesetzt sind. Derartige Elemente werden überall dort verwendet, wo eine große Wärmeübertragungsfläche benötigt wird, nämlich bei flüssigkeitsgekühlten Reaktoren. Dafür muß eine beträchtliche Vergrößerung der Resonanzabsorption durch die Aufteilung des Brennstoffs in dünne Platten bzw. Stäbchen in Kauf genommen werden. [21]
engl.: double lattice *franz.: réseau de grappes*

Doppel-Impuls-Generator. Hilfsgerät zur Prüfung der zeitlichen Auflösung von Verstärkern, Zählwerken, Registriervorrichtungen u. ä. m. Es gibt einen Doppelimpuls ab, bei dem Abstand und Größe, eventuell auch zeitlicher Verlauf der Impulsteile, eingestellt werden kann. [6]
engl.: double pulse generator
franz.: générateur à impulsions doubles

Doppelionisationskammer, ein aus zwei *Ionisationskammern zusammengesetztes Gerät, wobei die beiden Kammern nur durch eine äußerst dünne Metallfolie getrennt sind, durch welche rasche Teilchen ohne nennenswerten Energieverlust hindurchfliegen können. Die D. dient dazu, allein diejenigen Teilchen zu registrieren, deren Bahn innerhalb einer der beiden Hälften der D. endet. Die beiden Hälften gemeinsame Metallfolie ist zu diesem Zweck an den Verstärker der Registriervorrichtung gelegt, die beiden äußeren Elektroden an je eine gleich hohe positive und negative Spannung. Fliegt nun ein Teilchen durch beide Hälften der Kammer hindurch, so treffen aus der einen Hälfte nur die positiven, aus der anderen nur die negativen Ionen auf die Mittelelektrode, so daß beide sich aufheben und keine Registrierung erfolgt. Bleibt dagegen das Teilchen irgendwo in der Kammer stecken, so kommen aus der zweiten Hälfte weniger Ionen als aus der ersten (evtl. gar keine) ; die beiden Anteile heben sich nicht auf und das Teilchen wird registriert. [1]
engl.: double ionization chamber
franz.: double chambre à ionisation
Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Doppler-Effekt, s. Nachtrag.

Doppler-Verbreiterung ist eine spezielle, sehr wichtige Form der *Linienverbreiterung. Sie entsteht dann, wenn die (mikroskopischen) Strahlenquellen (Atome, Moleküle, Kerne) relativ zum Beobachter nicht alle die gleiche Geschwindigkeit haben, so daß in jedem Einzelfall eine andere Doppler-Verschiebung auftritt. Zum Beispiel haben die Moleküle eines Gases eine Maxwellsche Verteilung der Geschwindigkeitsbeträge. Daher treten neben der Spektrallinie, die das Molekül in Ruhe aussendet, Linien höherer und niedri-

gerer Frequenz symmetrisch verteilt auf. Dieser Streubereich wird um so größer, je höher die Temperatur ist. In der Kernphysik, insbesondere in der Reaktorphysik, spielt dieser Effekt eine Rolle bei der Untersuchung von Absorption und Streuung an Resonanzstellen. Hier hat man auch eine M a x w e l l sche Geschwindigkeitsverteilung der Atomkerne und eine bestimmte, u. U. auch M a x w e l l sche Geschwindigkeitsverteilung der Neutronen.
Selbst bei einer definierten Energie der Neutronen weicht der effektive Wirkungsquerschnitt merklich von dem naiven theoretischen Wert ab, weil die Wärmebewegung der Kerne die Relativenergie Kern-Neutron und damit den von d i e s e r Energie abhängigen Wirkungsquerschnitt verändert. [7]
engl.: Doppler broadening
franz.: effet (d'élargissement) Doppler

Doppler-Verschiebung, s. Doppler-Effekt.

Dosimeter, s. Dosismeßgeräte.

Dosimetrie, Dosismessung, d. h. die Bestimmung der im Volumen absorbierten Energie. Die Bestimmung der absorbierten Energie kann auf verschiedene Weise erfolgen. Die F e s t k ö r p e r - D. benützt Strahlenreaktionen im Festkörper, wie die Fluoreszenz der Phosphore, die Leitfähigkeitsänderung von Halbleitern, die Schwärzung einer photographischen Emulsion. C h e m i s c h e D. ist die Ausnützung strahlenchemischer Reaktionen in wäßrigen anorganischen und organischen Lösungen. Man unterscheidet hier Redoxreaktionen (z. B. Oxydation von Fe^{++} zu Fe^{+++} oder Reduktionen von Ce^{++++} zu Ce^{+++}) und Reaktionen, bei denen Moleküle oder Molekülgruppen abgespalten werden (z. B. Abspaltung von HCl aus Chloroform). Die I o n i s a t i o n s - D. nimmt die Bildung von Ionen in Gasen zur Dosisbestimmung. Hauptsächlich wird Luft als Füllgas der Ionisationskammer verwendet (z. B. bei der Festlegung der r-Einheit). [18, 26]
engl.: dosimetry *franz.: dosage, dosimétrie*
Lit.: Hine u. Brownell, Radiation Dosimetry, Academic Press, New York, 1956.

Dosis. Der aus der Pharmakologie entlehnte Begriff D. wird auf ionisierende Strahlen angewandt. Er

Dosis läßt verschiedenartige Auslegungen zu und kann daher nur in Verbindung mit Zusatzworten eindeutig definiert werden:

a) Absorbierte oder Energie-Dosis

$$D = \frac{\mathrm{d}W_z}{\mathrm{d}m}.$$

Dabei ist $\mathrm{d}W_z$ die in einem Körperelement der Masse $\mathrm{d}m$ durch ionisierende Teilchen an der interessierenden Stelle zugeführte Energie. Einheit: „rad" (radiation absorbed dose). 1 rad = 100 erg/g = 0,01 Ws/kg. Die Energiedosis läßt sich wegen der sehr kleinen Energiebeträge schlecht direkt (z. B. kalorimetrisch) messen. Daher nimmt man die Ionisation von Gasen, insbesondere von Luft zur Hilfe. Die elektrische Ladung der in einer Ionisationskammer gebildeten Ionen wird zwischen zwei Elektroden unter Sättigungsspannung gemessen.

Unter integraler absorbierter D. versteht man das Integral der absorbierten Energie über einen interessierenden Bereich. Die Einheit ist das „Grammrad" (1 g rad = 100 erg).

engl.: absorbed dose *franz.: dose absorbée*

b) Bestrahlungsdosis

$$D_\gamma = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}m},$$

wobei mit $\mathrm{d}Q$ die Ionenladung eines Vorzeichens bezeichnet ist, die durch Röntgen- oder Gammastrahlen in einem Luftvolumenelement der Masse $\mathrm{d}m$ an der interessierenden Stelle bei Elektronengleichgewicht erzeugt wird. Einheit: „Röntgen" (r). 1 r ist definiert als Bestrahlungsdosis solcher Größe, daß die damit verbundene Korpuskularemission pro 0,001293 g Luft Ionen in Luft erzeugt, die eine elektrostatische Einheit (ese) der Elektrizitätsmenge beiderlei Vorzeichens trägt. 1 r entspricht 773,4 ese/g oder $2{,}58 \cdot 10^{-7}$ As/g oder $2{,}08 \cdot 10^{9}$ Ionenpaaren/cm^3 bei Luft von 0 °C und 760 Torr.

Die Bedingung des Elektronengleichgewichtes besagt, daß das zur Messung herangezogene Luftvolumen von einer Materieschicht solcher Dicke umgeben sein muß, die dicker ist als die Reichweite der Elektronen in

dieser Schicht, die ihrerseits aus Luft oder luftäquivalentem Material bezüglich der effektiven Ordnungszahl bestehen muß.

Unter kumulativer D. versteht man die Gesamtdosis, die aus wiederholten Bestrahlungen einer Körperregion oder des ganzen Körpers resultiert.
engl.: exposure dose
franz.: dose de rayonnement, dose d'irradiation

c) Die Ionen- oder Ladungsdosis Δ ist als ein ebenfalls auf der Luftionisation beruhender Dosisbegriff für sämtliche ionisierenden Strahlen ohne die einschränkende Bedingung des Elektronengleichgewichtes vorgeschlagen worden. Sie ist definiert als Quotient aus der Ionenladung $\mathrm{d}Q$ eines Vorzeichens, die von der ionisierenden Strahlung unmittelbar oder über sekundäre Korpuskularemission in einem Luftvolumenelement an der interessierenden Stelle erzeugt wird, und der Masse $\mathrm{d}m$ der Luft des Volumenelementes:

$$\Delta = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}m} .$$

Die Einheit der Ionen- oder Ladungsdosis hat noch keinen Namen und entspricht $2{,}58 \cdot 10^{-7}$ As/g oder 773,4 ese/g.

Die Ionendosis hat den Vorteil gegenüber der Bestrahlungsdosis, daß sie für alle ionisierenden Strahlen gilt und die Ermittlung der D. auch an Körperoberflächen oder hinter Schichten gestattet, hinter denen kein Elektronengleichgewicht herrscht. Außerdem kann aus der der direkten Messung zugänglichen Ionendosis mit Hilfe der Bragg-Grayschen Beziehung die Energiedosis ermittelt werden.

Während zur Messung der Bestrahlungsdosis (vielfach nur D. genannt) in der Praxis vorwiegend Kleinkammern (Fingerhut, Topf-Kammern) benutzt werden, erfolgt die Darstellung des „Röntgen" und die Kalibrierung der Dosimeter mit sog. Faß- oder Parallelplattenkammern, deren Luftvolumen so groß sein muß, daß in dem kleineren, zur Messung herangezogenen Luftvolumen Elektronengleichgewicht herrscht.

Zum Vergleich der folgenden Zahlenangaben sei angeführt, daß man bei einer Röntgen-Aufnahme

 der Brust eine Bestrahlungsdosis von 0,04 bis 2 r erhält.

engl.: exposure dose
franz.: dose ionique

In der Radiologie unterscheidet man:

a) Austrittsdosis, die D., die auf der dem Einfallsfeld entgegengesetzten Körperseite noch vorhanden ist.

engl.: delivery dose
franz.: dose de l'expulsion

b) Einfallsdosis, die unmittelbar vom Röhrenfokus ausgehende Primärstrahlung, auch „D. frei Luft" genannt, weil sie in freier Luft ohne streuendes Medium gemessen wird.

engl.: incident dose
franz.: dose incidente

c) Epilationsdosis. Oberhalb von 400 r Oberflächendosis tritt an behaarten Stellen mit Sicherheit eine Epilation ein, d. h. etwa 14 Tage bis 3 Wochen nach der Bestrahlung fallen die Haare aus und es kommt zu einer Pigmentierung der Haut. Nach 6 bis 8 Wochen wachsen die Haare wieder nach.

engl.: epilation dose
franz.: dose d'épilation

d) Erythemdosis, s. Erythem.

engl.: erythema dose
franz.: dose d'érythème

e) Gewebedosis, die von einem Körpergewebe absorbierte Strahlenmenge.

Zur Bestimmung der von äußeren Strahlenquellen herrührenden zulässigen G. in rad gilt die Beziehung:

$$\text{zulässige Dosis in rad} = \frac{\text{zulässige Dosis in rem}}{\text{relative biol. Wirksamkeit (RBW)}}$$

Von der ICRP werden folgende RBW-Werte empfohlen, für alle kritischen Organe entsprechend dem Wert der mittleren spezifischen Ionisation in dem kritischen Organ, in welchem er am höchsten ist: für Röntgen-Strahlen, Elektronen und Positronen jeder spezifischen Ionisation: 1, für schwere ionisierende Teilchen:

mittlere spez. Ionisation (Ionenpaare/μ Wasser)	RBW	Durchschnittl. linearer Energieumsatz in Wasser (keV/μ)
unter 100	1	unter 3,5
100–200	1–2	3,5–7,0
200–650	2–5	7,0–23
650–1500	5–10	23–53
1500–5000	10–20	53–175

Für Ganzkörperbestrahlung und für die empfindlichsten kritischen Organe kann in der Praxis für schnelle Neutronen und Protonen bis zu 10 MeV eine RBW von 10, für schwere Rückstoßkerne eine RBW von 20 benutzt werden.
engl.: tissue dose
franz.: dose tissulaire

f) H e r d d o s i s , die Gesamtdosis, die einem Krankheitsherd verabfolgt wird. Im Falle der Bestrahlung von einem Feld aus ist sie mit der Tiefendosis identisch.

g) H e r d r a u m d o s i s wurde in Parallele zur Volumendosis geschaffen. Sie ist das Produkt aus Herdvolumen und Herddosis.

h) L e b e n s d o s i s , hierfür wird die Jahresdosis mal Zahl der Jahre oberhalb 18 angesetzt, also $5 \times$ (Alter $-$ 18).

i) O b e r f l ä c h e n d o s i s , die D. an der Hautoberfläche bzw. an der Oberfläche des bestrahlten Körpers. Sie ist die um den Betrag der Rückstreuung vermehrte D., die die Oberfläche der Haut wirklich erhält.
engl.: surface dose
franz.: dose en surface

k) O r g a n d o s i s , Mittelwerts-D. an den einzelnen Stellen eines Organs unter Berücksichtigung einer möglichen Schädigung des Organs. Bei Ganzkörperbestrahlung kann die O. in grober Annäherung mit Hilfe einer mittleren oder effektiven Tiefe des Organs unter der Hautoberfläche ermittelt werden. Dazu werden von der ICRP folgende Werte vorgeschlagen:

Haut:	0,07 mm
blutbildende Organe:	5 cm

Ovarien:	7	cm
Hoden je nach den Bestrahlungsbedingungen verschieden im Minimum:	1	cm
Augenlinse:	3	cm

Bei ungleichmäßiger Strahlungsverteilung im Organ muß ein örtlich begrenztes Volumen innerhalb des Organs betrachtet werden, in dem die höchste Dosis erreicht wird (kritisches Volumen). Für die blutbildenden Organe kann man als kritisches Volumen etwa 1 cm^3 an der Körperstelle annehmen, an der die Dosis am größten ist, für die Gonaden (Keimdrüsen) kann man 10 % des Gesamtvolumens beider Gonaden in dem Bereich annehmen, in dem die Dosis am größten ist, für die Augenlinse ist das krit. Volumen der Bereich, in dem sich die Zellkerne befinden. Die zulässige Wochendosis für die kritischen Organe bei Belastung des gesamten Körpers mit Röntgen- oder γ-Strahlen beträgt

Haut: 600 mr/Woche $\approx$ 0,6 rad/Woche in der Basalschicht der Epidermis einer kritischen Fläche (etwa 1 cm^2 der Stelle, an der die Dosis am größten ist),
blutbildende Organe: 300 mr/Woche $\approx$ 0,3 rad/Woche als Mittelwert in einem kritischen Volumen,
Gonaden: 300 mr/Woche $\approx$ 0,3 rad/Woche als Mittelwert in einem kritischen Volumen,
Augen: 300 mr/Woche $\approx$ 0,3 rad/Woche in einem kritischen Volumen (bes. im Bereich der Augenlinse).

Für schnelle Neutronen sind die entsprechenden Zahlenwerte

Haut: 0,6 rem/Woche $\approx$ 0,06 rad/Woche,
blutbildende Organe: 0,3 rem/Woche $\approx$ 0,03 rad/Woche,
Gonaden: 0,3 rem/Woche $\approx$ 0,03 rad/Woche,
Augen: 0,3 rem/Woche $\approx$ 0,03 rad/Woche.

engl.: organ dose
franz.: dose local absorbée

l) **Ortsdosis**, die an einer beliebigen Stelle eines Raumes gemessene Strahlenmenge, wenn sich ein Phantom oder ein anderer Gegenstand im Nutzstrahlenbündel einer Strahlenquelle befindet.

engl.: local dose *franz.: dose locale*

m) Personendosis, die Strahlenmenge, die eine Person im Verlaufe ihrer Arbeit empfängt. Die P. wird vielfach mit Hilfe von Taschendosismessern oder photographischen Filmen (Schwärzung) ermittelt.
engl.: personal dose
franz.: dose personnelle
n) Tiefendosis, die prozentuale Dosis in 10 cm Tiefe bezogen auf die Oberflächendosis bei Bestimmung der Dosis in einem Wasserphantom. Die T. ist nicht nur ein Volumeneffekt, sondern es besteht eine starke Abhängigkeit der T. zugleich auch noch von der Strahlenqualität, der Feldgröße, vom Abstand der Strahlenquelle. Die Homogenität der Strahlung spielt nur eine untergeordnete Rolle.
engl.: depth dose
franz.: dose en profondeur
o) Toleranzdosis, höchstzulässige D. für den menschlichen Gesamtorganismus bzw. einzelne Organe. Es ist die D. ionisierender Strahlung, die nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen und Erfahrungen aller Voraussicht nach der betreffenden Person während ihrer Lebenszeit keinen merklichen körperlichen Schaden zufügt. Zur Zeit gilt für beruflich strahlenbelastete Personen bei Ganzkörperbestrahlung als zulässige Wochendosis 300 mrem, jedoch nicht mehr als 5 rem/Jahr.
engl.: maximum dose, tolerance dose
franz.: dose admissible
p) Wochendosis, zulässige, diejenige im Verlauf einer Woche erreichte Dosis energiereicher Strahlen, die nach den gegenwärtigen Kenntnissen einem Menschen keinen merklichen Schaden zufügt, auch wenn man sie über beliebig lange Zeit verabfolgt. Nach den Empfehlungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz ist zur Zeit die z. W. für Bestrahlung mit Röntgen- und Gammastrahlen folgendermaßen festgelegt.
Haut: 0,6 r/Woche, blutbildende Organe: 0,3 r/Woche, Gonaden: 0,3 r/Woche, Augen: 0,3 r/Woche.
Ganz entsprechend beträgt die z. W. bei Anwendung von Betastrahlen 0,3 r/Woche. Die z. W. bei Anwendung von raschen Neutronen und Alphastrahlen erhält

man durch Division der angegebenen Werte mit den relativen biologischen Wirksamkeiten. Die von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz aufgestellten z. W. soll vor allem für Personen gelten, die berufsmäßig mit energiereicher Strahlung umgehen. Wenn weite Bevölkerungskreise für längere Zeit einer Strahlenbelastung ausgesetzt sind, so empfiehlt die Kommission die maximal zulässige Dosiswerte auf $^1/_{10}$ der maximal zulässigen Werte herabzusetzen, die für berufliche Strahlenbelastung festgelegt sind. [26, 28]
engl.: weekly dose
franz.: dose par semaine, dose hebdomadaire permise

Lit.: Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Physik, Bd. 2, Ziff. 7, S. 513, Teubner, 1956. – Landolt-Börnstein, Bd. IV/3, Ziff. 46. – Empfehlungen der Internationalen Kommission für radiologische Einheiten. Fortschr. Geb. d. Röntgenstrahlen, Bd. 81, 1954, 688–692. – B. Rajewsky, E. Bunde, M. Dorneich, D. Lang, A. Sewkor, R. Jaeger und W. Hübner, Darstellung, Wahrung und Übertragung der Einheit der Dosis für Röntgen- und Gammastrahlen mit Quantenenergien zwischen 3 keV und 400 keV. Veröffentlicht durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 1955. – B. Rajewski, Strahlendosis und Strahlenwirkung, Thieme-Verlag, Stuttgart, 1956.

Dosiseffektkurve. Der Begriff findet bei statistischen Untersuchungen der Strahlenwirkung auf biologische Objekte Anwendung. Die D. registriert den Prozentsatz der Objekte, welche einen bestimmten, zur Registrierung gelangenden biologischen Effekt anzeigen, in Abhängigkeit von der *Dosis. [28]
engl.: dose-effect curve
franz.: courbe de l'effet en fonction de la dose

Dosiskonstante von γ-Strahlern. Die Dosisleistung der γ-Strahlung in der Entfernung d von einer einigermaßen punktförmigen radioaktiven Substanz mit der Aktivität S in der Entfernung d ist

$$D = i_\gamma \cdot S/d^2$$

i_γ heißt D. des radioaktiven Stoffes. Mißt man S in Curie (c), d in m und D in r/h, so erhält man i_γ in $\mathrm{r \cdot m^2/(c \cdot h)}$. Im Bereich $0{,}1 < E < 3$ MeV gilt $i_\gamma \approx 1{,}5 \cdot 10^{-11} f \cdot E$. Die D. hängt ab von der Zahl f und der Quantenenergie E der pro Zerfall emittierten γ-Quanten. Abschirmungen sind nicht berücksichtigt. Nur bei Ra wird die D. gewöhnlich für ein allseitig von 0,5 mm Pt umschlossenes Präparat angegeben. Tabel-

len und Kurven für D. s. Landolt-Börnstein, Zahlenwerte u. Funktionen, 6. Aufl. [15]
engl.: spezific γ-ray emission
franz.: constante de dose

Lit.: F. Kohlrausch, Praktische Physik, 20. Aufl., Teubner, Stuttgart. – H. Ebert, Phys. Taschenbuch, 2. Aufl., Vieweg, Braunschweig. – Graul, Fortschritte d. angew. Radioisotopie, Heidelberg, 1957.

Dosisleistung, Dosis je Zeiteinheit. Orts-D. ist die an einer beliebigen Stelle eines Raumes gemessene D., wenn sich ein Phantom oder ein anderes Objekt im Nutzstrahlenbündel der Strahlenquelle befindet. Einheit: rad, dividiert durch Zeit. [28]
engl.: dose rate
franz.: effet dose, dose unitaire

Dosisleistungsmesser. Instrument oder Gerät zur Messung der Dosisleistung. [6]
engl.: dose rate meter

Dosismeßgerät. D.e dienen zur Messung der *Dosis von energiereichen Strahlen. Zur Messung der Dosis von Röntgen-Strahlen in r (Röntgen)-Einheiten werden luftgefüllte Faßkammern oder luftgefüllte Kammern mit luftäquivalenten Wänden benutzt; zur Messung gelangen die in ihnen erzeugten Ionisationsströme. Zur Messung der Dosis von α- und β-Strahlen dienen vor allem Ionisationskammern mit genügend dünnen (dem Durchdringungsvermögen der Strahlen entsprechenden) Eintrittsfenstern. Zur Messung der Dosis von schnellen Neutronen dienen Ionisationskammern, deren Füllung oder deren Wand wasserstoffhaltig ist; die Ionisation in diesen Kammern rührt von den durch die Neutronen in Bewegung gesetzten Rückstoßprotonen her. Zur Dosierung von γ-Strahlen dienen auch geeignet aktivierte Kadmiumsulfid-Kristalle, deren Leitfähigkeitsänderung als Maß für die Dosis dient. Ganz allgemeine Anwendung finden in der Dosimetrie als Detektoren organische Leuchtstoffe, deren Fluoreszenzintensität mit einem Sekundärelektronenverstärker gemessen wird. Ferner werden als Maß für die Dosis die Schwärzung photographischer Filme, chemische Umsetzungen in Lösungen oder festen Körpern und die Verfärbung von Kristallen und Gläsern benutzt. [28]
engl.: dose meter *franz.: dosimètre*

Dosismessung, s. Dosimetrie.

Dosisprotrahierung. Unter der D. versteht man die Herabsetzung der Strahlenintensität bei gleichzeitiger Verlängerung der Bestrahlungsdauer, so daß die Dosis konstant bleibt. Das hat gewöhnlich zur Folge, daß bei einer Protrahierung größere Gesamtdosen als bei großen Intensitäten erforderlich sind, um gleiche Wirkungen zu erzielen. Es gilt in diesem Falle die Schwarzschildsche Regel $W = I \cdot t^p$, wobei p den Schwarzschild-Exponenten darstellt, der für biologische Strahlenwirkungen in dem Bereich zwischen etwa 0,6 und 1,4 liegt. Der weitaus häufigste Fall ist, daß $p < 1$. $p = 1$ liegt z. B. bei Strahlenmutationen, Abtötung von Bakterien, Viren und Phagen durch Röntgen-Strahlen vor. [28]
engl.: protraction dose franz.: étalement de la dose

Dosisüberwachung, individuelle Messung der Dosis durch Filmplaketten und Dosimeter bei Personal, das in Betrieben arbeitet, in denen Kernstrahlung auftritt. [6]

Dosiswirkungskurve, s. Dosiseffektkurve.

Dosis-Zuwachsfaktor, s. Zuwachsfaktor.

Dounreay, Ort in Schottland, in dessen Nähe die Reaktorstation mit den Reaktoren *FRED und *DMTR arbeitet.

Dowex, s. Amberlite.

Dowtherm, amerikanische Werksbezeichnung einer organischen Substanz, die als Kühlmittel verwendet wird. In Deutschland entspricht es dem *Diphyl. [20]

DPPH, **Diphenylpikrylhydrazyl,** durch Resonanz mit dem Benzolringsystem stabilisiertes Radikal, das oft zum Einfangen und zur Bestimmung kurzlebiger, durch ionisierende Strahlung gebildeter Radikale benutzt wird.

$(C_6H_5)_2N{-}\dot{N}{-}C_6H_2(NO_2)_3$

Da DPPH farbig ist, kann die Änderung der DPPH-Konzentration relativ leicht gemessen werden. Das

DPPH reagiert prinzipiell nach folgendem Schema:

$$>N-\dot{N}< \quad + R\cdot \quad \rightarrow \quad >N-N<_{R}$$

Die beiden einzelnen Elektronen bei N· und R· formieren sich zu einer neuen Bindung N—R. [18]

Drehanodenröhren. Weitaus die größte Energiemenge, die durch die Elektronen in der Röntgen-Röhre an die Antikathode abgegeben wird, tritt als Wärme auf. Um das Antikathodenmaterial vor dem Schmelzen zu schützen, wird die Antikathode als Scheibe ausgebildet und derart angeordnet, daß das Elektronenstrahl-Bündel (Strichfokus) nahezu an der Peripherie dieser rotierenden, von außen durch Induktion angetriebenen Scheibe auffällt. Das Elektronenstrahlbündel bleibt dabei raumfest. Durch die Drehung der Antikathoden-Scheibe trifft der Elektronenstrahl infolge der Rotation der Scheibe nur äußerst kurzzeitig auf einen Scheibenfleck auf, so daß bis zum nächsten Durchgang dieser Stelle genügend Zeit zur Ableitung der entstandenen Wärme besteht. [28]
engl.: rotating-anode x-ray tube
franz.: tube à anticathode tournante

D.R.E.M. Abk. für Direction des Recherches et Exploitations Minières, Abt. des franz. Atomenergiekommissariates (*Commissariat à l'Énergie Atomique), zuständig für Uranerzausbeute im Bereich des CEA. [24]

Dresden Nuclear Power Station, s. Nachtrag.

Dresden-Reaktor, s. Zentralinstitut für Kernphysik.

Drift, langsame Veränderung einer Meßgröße, z. B. 1. des Verstärkungsgrades oder der Nullpunktlage in Verstärkeranlagen als Folge von Alterserscheinungen der Röhren oder Batterien, 2. der Leistung eines Reaktors als Folge von Abbrand und Änderung der Konzentration der Reaktorgifte. Sie erfordert ständige Kontrollen und Nacheichungen. 3. Änderung der gegenseitigen Lage von Ladungsträgern im Plasma, s. Strömungen im Plasma. [6]
engl.: drift *franz.: dérive*

Driftröhren, s. Nachtrag.

Drosseln. In der Hydro- und Thermodynamik versteht man unter dem Vorgang des D.s eine Zustands-

änderung (Druckverminderung) bei gleichbleibender Enthalpie und zunehmender Entropie. In der Technik wird damit die Herabsetzung einer Durchflußmenge bezeichnet. Bei Reaktoren muß die Durchflußmenge der einzelnen *Brennstoffkanäle entsprechend der Wärmeleistung jedes Kanals gedrosselt werden. Hierzu enthält jeder Kanal eine besondere Einrichtung. [8]
engl.: orificing
franz.: dispositif d'étranglement (vanne de laminage)

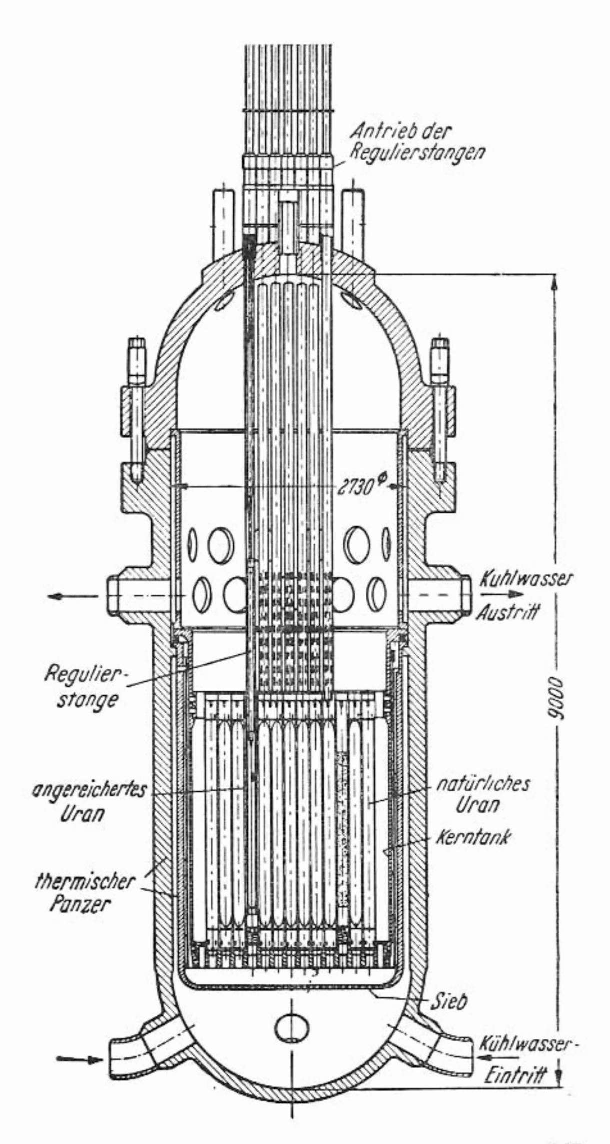
Druck, magnetischer, s. Pinch-Effekt.
engl.: magnetic pressure
franz.: pression magnétique

Druckerzeuger. Bei flüssigkeitsgekühlten Reaktoren muß das ganze Kreislaufsystem unter einem bestimmten konstanten Überdruck stehen. Bei amerikanischen Anlagen wird das Problem durch Beheizen (notfalls Kühlung) der Flüssigkeit in einem *Ausgleichsbehälter gelöst. Dieser Behälter führt dann die Bezeichnung D. [8]
engl.: pressurizer
franz.: générateur de pression, pressuriseur

Druckgefäß. Bei allen bis jetzt bekannt gewordenen Typen von Kernkraftwerken steht das Kühlmittel des Reaktors unter Überdruck. Der Reaktorkern ist deshalb meist von einem druckfesten Behälter umschlossen. Sowohl bei Druckwasser- als auch bei gasgekühlten Reaktoren ist die erreichbare Leistung wesentlich vom zulässigen Überdruck abhängig. Eine der Leistungsgrenzen dieser Reaktoren ist daher durch die ausführbare Wandstärke des D.s gegeben. S. Abb. [8]
engl.: pressure vessel
franz.: récipient sous pression

Druckguß. Gießverfahren, bei welchem das Metall in flüssigem, gelegentlich auch in halbaufgeschmolzenem Zustand unter Druck in die Gießform eingebracht wird. D. eignet sich vor allem für die serienmäßige Herstellung von Werkstücken bei geringer Nacharbeit.

Längsschnitt des Reaktordruckgefäßes für das Kernkraftwerk Shippingport (USA).


Antrieb der
Regulierstangen
2730 φ
Kühlwasser
Austritt
Regulier-
stange
9000
angereichertes
Uran
natürliches
Uran
Kerntank
thermischer
Panzer
Sieb
Kühlwasser-
Eintritt

Spritzguß und Preßguß sind ältere Bezeichnungen für Druckguß. [4]
engl.: pressure die casting
franz.: moulage sous pression

Druckkoeffizient der Reaktivität, s. Nachtrag.

Drucksintern (Heißpressen). Pressen von metallischem oder auch nicht-metallischem Pulver in einer geeigneten Form bei gleichzeitigem Erhitzen. Dabei entsteht aus dem Pulver durch Diffusion ein gesintertes, kompaktes Werkstück. [4]
engl.: hot pressing
franz.: frittage sous pression, pressage à chaud

Drucktensor, s. Gradsche Lösung der Boltzmann-Gleichung.

Druckverlust. Der D. im Primärkreislauf eines Reaktors ist proportional der Umwälzpumpenleistung und näherungsweise dem Quadrat der Durchflußgeschwindigkeit. Bei der Auslegung eines Reaktors ist daher der zulässige D. des Kühlkreislaufes ein wesentlicher Parameter. Der Druckabfall in den einzelnen Kreislaufteilen läßt sich in zwei Summanden aufspalten:

$$\frac{\partial p}{\partial s} = \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_{id} + \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_r \quad .$$

Dabei ist $(\partial p/\partial s)_{id}$ der Druckgradient, der sich einstellen würde, wenn die Strömung reibungsfrei wäre und $(\partial p/\partial s)_r$ der für den Verlust an Strömungsenergie verantwortliche Anteil des Druckgradienten. Der Druckverlust zwischen zwei beliebigen Punkten einer Stromlinie ist dann

$$\Delta p = p_1 - p_2 = - \int_1^2 \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_r \mathrm{d}s \, .$$

Die genauere Kenntnis des Druckverlustes in Reaktorkühlkreisläufen ist für die richtige Auslegung der Pumpen oder Gebläse wichtig. Bei inkompressiblen Strömungen läßt sich der Druckverlust in Leitungen in der Form

$$\Delta p = \lambda \frac{\gamma \overline{w^2} l}{2 g \cdot 2 r_h}$$

schreiben, wobei γ/g die Dichte der Flüssigkeit, $\overline{w}$ die mittlere Durchflußgeschwindigkeit, l die Länge der Leitung, r_h der hydrauliche Radius (siehe gleichwertiger *Durchmesser) und λ die Widerstandsziffer der Leitung ist (im amerikanischen Schrifttum wird diese Gleichung als *Fanning-equation* und $f = \lambda/4$ als *friction factor* bezeichnet).

Druckverlust

In ähnlicher Form schreibt man den Druckverlust eines einzelnen Hindernisses (Blende, Krümmer, Einlaufstück usw.)

$$\Delta p = \xi \frac{\gamma}{2\,g} \overline{w}^2$$

und definiert auf diese Weise die Widerstandsziffer ξ eines Hindernisses. Die Hauptaufgabe bei der Berechnung des Druckverlustes besteht in der Ermittlung der Widerstandsziffern. Zahlreiche Meßergebnisse und halbempirische Formeln stehen dafür zur Verfügung. Für laminare Strömung durch zylindrische Rohre ist für Re < 2320

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

und für turbulente Strömung in glatten Rohren ermittelte Blasius für $3 \cdot 10^3 < \text{Re} < 3 \cdot 10^5$ die Beziehung

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}}\,.$$

Ein universelles Widerstandsgesetz, das praktisch für alle Reynolds-Zahlen der turbulenten Rohrströmung gilt, wurde von Prandtl und Nikuradse angegeben:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\text{Re}\,\sqrt{\lambda}\right) - 0{,}8$$

Für rauhe Rohre gilt nach von Karman und Nikuradse

$$\lambda = \left(2 \log \frac{r_h}{k_s} + 1{,}74\right)^{-2},$$

dabei ist k_s die sog. Sandkornrauhigkeit. Bei Strömungen von kompressiblen Gasen oder Dämpfen ist die

Berechnung von Druckverlusten etwas umständlicher (s. z. B. F a n n o sche Kurven), insbesondere wenn es sich um eine Strömung mit Wärmezufuhr handelt.

Bei Siedewasserreaktoren ist es zur Untersuchung der *Stabilität der Strömung notwendig, den Druckabfall bei einer Zweiphasenströmung zu kennen. Für einen senkrechten zylindrischen Kühlkanal spaltet man den gesamten Druckabfall gemäß

$$\Delta p = \Delta p_h + \Delta p_b + \Delta p_r$$

in einen von der Reibung verursachten Anteil Δp_r, einen Beschleunigungsanteil Δp_b (hervorgerufen durch die Dichteänderungen bei der Erwärmung und Verdampfung) und in den statischen Druckabfall Δp_h auf. Zur Berechnung von Δp_r wurden verschiedene Methoden vorgeschlagen. Die einfachste benützt die Annahme, daß Wasser und Dampf in jedem Querschnitt dieselbe Temperatur und Geschwindigkeit w haben und durch eine R e y n o l d s - Zahl

$$\mathrm{Re} = D_h \, \varrho \, w \left(\frac{1 - x}{\mu_f} + \frac{x}{\mu_d} \right)$$

gekennzeichnet werden können, wobei D_h der hydrauliche Durchmesser, ϱ die Dichte, x der Dampfgehalt, μ_f die Zähigkeit der Flüssigkeit und μ_d die Zähigkeit des Dampfes ist. Mit dieser R e y n o l d s - Zahl wird dann die Widerstandsziffer λ an einer Stelle x für ein Längenelement dl nach der üblichen Methode berechnet. Mit Hilfe der Energiebilanzgleichung läßt sich dann schrittweise der Druckabfall längs des Kühlkanals ermitteln (*engl.: homogeneous-* oder *fog flow method*). Eine etwas genauere Methode berücksichtigt noch den Unterschied zwischen Dampf und Wassergeschwindigkeit (*engl.: slip flow method*). Der Beschleunigungsanteil des Druckabfalls kann in der Form

$$\Delta p_b = \frac{G^2}{\varrho_f} \left[\frac{(1 - x)^2}{1 - \alpha} + \frac{x^2}{\alpha} \left(\frac{\varrho_f}{\varrho_d} \right) - 1 \right]$$

geschrieben werden, wobei G die *Mengenflußdichte und α der Volumenteil des Dampfes in der Wasserdampfmischung ist. Der Abfall des statischen Druckes

läßt sich mit Hilfe der Beziehung

$$\Delta p_s = g \int_0^l \varrho \, dl$$

berechnen. S. a. Kühlmittel-Druckverlust. [5, 8]
engl.: (frictional) pressure drop
franz.: perte de pression

Lit.: K. Kaufmann, Technische Hydro- und Aeromechanik, Springer, Berlin, 1954. – Chemical Engineering Progress Symposium, Series No. 11, Vol. 50, 1954, S. 115. – J. Diamond, Heat Removal from Nuclear Power Reactors, Journal British Nuclear Energy Conference, Vol. I, Nr. 3, S. 227, 1956.

Druckwasserreaktor. Bei diesem primär in den USA entwickelten Reaktortyp (U-Boot Nautilus, Anlage Shippingport) dient Wasser als Kühlmittel und Moderator. Um eine Dampfbildung zu verhindern, liegt die Siedetemperatur des Druckwassers etwa 50 °C höher als die höchste Reaktortemperatur. Der sich daraus ergebende Systemdruck von ca. 150 at bedingt sehr dickwandige Leitungen und Behälter.

Jeder Leistungsreaktor ist unter optimaler Wahl des Kraftwerkswirkungsgrades η_k, der verschiedenen Leistungsdichten, der Reaktorleistung, der Material- und Herstellungskosten, des Abbrandes und des Lastfaktors zu konstruieren. Die wesentlichen Kennzeichen des D.s sind:

1. Infolge der guten Wärmeübertragungseigenschaften von Wasser werden eine hohe Leistungsdichte und demzufolge kleine Abmessungen erzielt.
2. Um auch noch bei den erwünschten hohen Temperaturen des Kühlmittels eine ausreichende moderierende Wirkung des Wassers zu sichern, verhindert man durch hohen Druck (bis zu 170 atm) ein Sieden des Wassers.
3. Die Betriebstemperatur des Kühlmittels liegt etwa bei 280 °C, was einen verhältnismäßig schlechten Wirkungsgrad η_k bedingt. In den Wärmeaustauschern kann nur Sattdampf erzeugt werden, was die Verwendung von Sattdampfturbinen oder eines konventionell (evtl. auch nuklear) beheizten Überhitzers notwendig macht.
4. Alle in der Spaltzone verwendeten Materialien müssen neben ihrer kerntechnischen Brauchbarkeit korro-

sionsbeständig gegenüber heißem Wasser sein. Daher muß der Druckkessel innen mit rostfreiem Stahl (C-armer Chrom-Nickel-Stahl) ausgekleidet werden. Als Hülsenmaterial für die Brennstoffelemente kommen Zircaloy oder rostfreier Stahl in Frage.

Um auch bei beschädigter Brennstoffhülse eine chemische Reaktion des Urans mit Wasser zu vermeiden und um einen hohen Abbrand zu erreichen, verwendet man zweckmäßig nicht reines Uranmetall, sondern eine entsprechende Uranlegierung oder UO_2 als Brennstoff. Je nach dem Kühlmittel (D_2O oder H_2O) muß eine Anreicherung des Urans mit U-235 erfolgen. Es zeigte sich, daß in den meisten Fällen nur eine leichte Anreicherung (bis zu etwa 3 %) wirtschaftlich ist. Um einen möglichst gleichmäßigen Neutronenfluß zu erhalten (*Flußabflachung), werden die Brennstoffelemente aus relativ hoch angereichertem Uran in einem äußeren Ring angeordnet. Mit UO_2-Elementen kann z. Z. ein Abbrand bis zu 10 000 MWd/t erreicht werden. Eine genügend große Wärmeübertragungsfläche läßt sich nur durch eine Aufteilung eines Brennstoffelementes in dünne Platten oder Stäbe (ca. 10 bzw. 100) erreichen. Die Regelstäbe können aus Hafnium, Bohr-Stahl oder aus Cd-Ag-Legierung, umhüllt mit rostfreiem Stahl, bestehen.

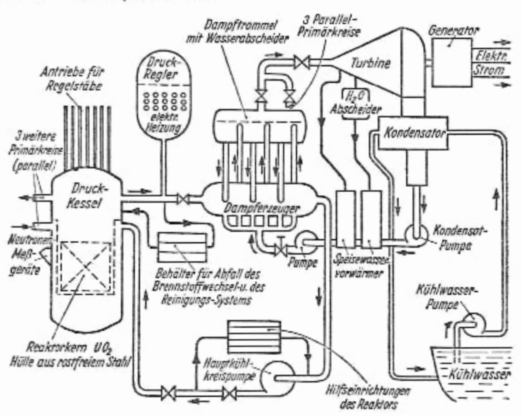


Abb. 1. Schema einer Druckwasseranlage

5. Der D. hat einen negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktivität ($\sim 10^{-4}$). Er ist inhärent stabil.

6. Infolge seines negativen Temperaturkoeffizienten folgt der Reaktor Lastschwankungen der Turbine automatisch, wodurch die Regelung des Kraftwerkes sehr vereinfacht wird. Dies erfolgt häufig durch Konstanthaltung der mittleren Kühlmitteltemperatur im Reaktor. Man kommt dann mit einem Minimum an zu regelnden Größen aus, was regeltechnisch günstig und zuverlässig ist. Allerdings treten dabei Materialbeanspruchungen durch Temperaturwechsel und relativ große Druckänderungen im sekundären Dampfkreis auf.

7. Ein Auswechseln bzw. Umordnen der Brennstoffelemente während des Betriebes ist nicht bzw. nur durch sehr komplizierte Vorrichtungen möglich. Dies hat einen gewissen Einfluß auf den Lastfaktor.

8. Eine Druckwasserreaktoranlage benötigt folgende Hilfseinrichtungen:

a) Druck-Regelsystem. Es hat die Aufgabe, Druckschwankungen im Primärkreis, welche z. B. durch Bewegung der Regelstäbe verursacht werden, auszugleichen. Die Druckregelung erfolgt durch elektrisches Aufheizen von Wasser in einem Druckhaltegefäß *(pressurizer)*.

b) Kühlmittelaufbereitungssystem. Um die Verunreinigungen im Wasser, also auch seine Radioaktivität, unter einem Grenzwert zu halten, muß ein Teil des Kühlmittels laufend gereinigt werden (z. B. mit Hilfe von Ionenaustauschern).

c) Einrichtungen zum In- und Außerbetriebnehmen des Primärkreises; Hochdruckpumpen, Kühlmittel-Vorrats- und Ablaßbehälter.

d) Einrichtungen für radioaktiven Abfall, der in den Ionenaustauschern des Kühlmittelaufbereitungssystems und im Primärkreis auftritt.

e) Automatische Bedienungseinrichtungen für Ventile.

f) Brennstoffelement-Auswechselsystem.

g) Sicherheitseinrichtungen. Um die Folgen eines auch unwahrscheinlichen Unfalls in dem unter hohem Druck stehenden Primärkreis so klein wie möglich zu

machen, wird der Reaktor mit dem Primärkreis in einen druckfesten dichten Behälter gesetzt.
Abb. 1 zeigt schematisch die Anlage eines D.s, ein Schnitt durch ein typisches Druckgefäß ist auf S. 267 wiedergegeben. Als Beispiel ist der Druckwasserreaktor von Shippingport unter PWR näher beschrieben. Im übrigen s. Reaktortabelle im Anhang. [8, 21]
engl.: pressurized water reactor
franz.: réacteur à eau sous pression, à eau pressurisée

Druckwassertest = Autoklavtest. Methode der Prüfung von Brennstoffelementen aus metallischem Uran auf Dichtigkeit der Hülse, insbesondere Dichtigkeit der Schweißnähte an den Stabenden. Man setzt das Brennstoffelement einige Minuten lang dem Einfluß von heißem Druckwasser aus (Temperatur etwa 200 °C). Undichtigkeiten in der Umhüllung machen sich durch die bei höheren Temperaturen stark beschleunigte Reaktion von Uranmetall mit Wasser bereits in kurzer Zeit durch *Aufbeulung der Hülse bemerkbar. Der Druckwassertest findet seine zeitliche Begrenzung durch den Angriff des Wassers auf das Hülsenmaterial. Im Falle von Zirkon kann man den Test deshalb länger ausdehnen, bei Aluminium muß man ihn früher abbrechen. Eine Variation des Druckwassertestes ist die Prüfung mit Wasserstoff unter Druck, die sich besonders bei Magnesium als Hülsenmaterial empfiehlt, und die Prüfung in Wasserdampf. [20]
engl.: autoclave test
franz.: épreuve de pression d'eau

DTTR, s. Nachtrag.

Dualismus von Welle und Teilchen. Elementarteilchen, wie Elektronen, Nukleonen, benehmen sich in gewissen Experimenten wie Massenpunkte, in gewissen anderen aber wie ein Wellenvorgang. Durchsetzen z. B. die energiereichen kosmischen Strahlen eine Nebelkammer, so erzeugen sie darin strichartige Spuren von kondensiertem Wasserdampf. Dieses Experiment zeigt den Teilchencharakter der Materiestrahlen. Durch Ablenkungsversuche in elektrischen und magnetischen Feldern kann man die Masse der Teilchen, ihre Geschwindigkeit und ihr Ladungsvorzeichen bestimmen. Durchsetzt dagegen ein Materiestrahl ein Gitter mit

passender Gitterkonstante, so treten die für Wellenvorgänge charakteristischen Interferenzerscheinungen analog zur Optik auf (s. Elektroneninterferenz, Neutronenbeugung). Die Ausmessung der Beugungserscheinung gestattet hier wie da die Angabe der Wellenlänge der auslösenden Strahlung, hier also der Materiestrahlen. Damit ist die Vorstellung von de Broglie, daß zu jeder materiellen Partikel auch ein periodisches Phänomen, eine Materiewelle gehört, experimentell bestätigt. Ein anderes, vielleicht noch bekannteres Beispiel für die Doppelnatur elementarer Gebilde ist das Licht. Dieses ist vom Physiker durch die letzten zwei Jahrhunderte hindurch ausschließlich als Wellenfeld verstanden worden. Die bekannten Beugungs- und Interferenzexperimente der Optik beweisen dies zur Genüge. Dagegen offenbart sich der Teilchencharakter des Lichts im *Compton-Effekt, lichtelektrischen Effekt und dergl. Erscheinungen, die zu Beginn dieses Jahrhunderts entdeckt wurden. Diese sind nicht durch einen Wellenvorgang zu deuten, sondern allein durch die Annahme von Licht quanten, also Korpuskeln. Demzufolge haben wir auch hier dieselbe Doppelnatur, die wir oben beim materiellen Elementarteilchen beschrieben haben.

Wenn auch das anschauliche Modell für die Darstellung des Elementargebildes fehlt, so stellt doch die Quantenmechanik einen einheitlichen mathematischen Formalismus dar, der z. B. in der Schrödinger-Gleichung die beiden Bilder miteinander verknüpft. Diese Darstellung enthält als Eigentümlichkeit die Unbestimmtheitsbeziehung. Diese gibt an, bis zu welchen Grenzen jedes Bild für sich brauchbar ist. Sie verhindert also die ausschließliche Benutzung eines Bildes, die auf die klassische Physik führt. Die Quantentheorie weist dadurch vollkommen neue Züge auf. [7]

engl.: dualism

franz.: dualisme ondes-particules

Lit.: Heisenberg, Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie, Hirzel, Stuttgart, 1949. – Philosophische Konsequenzen des D.: C. F. von Weizsäcker, Zum Weltbild der Physik, Hirzel, Stuttgart, 1948.

Dual-Untersetzer, s. Untersetzer.

Dublettmethode. Da der direkte Vergleich einer

Atommasse im *Massenspektrographen mit der Normalmasse 16,0000 des Sauerstoff-Isotops ^{16}O nicht mit genügender Genauigkeit möglich ist, mißt man die kleinen Abstände von Linien des Massenspektrums aus, die zu nahezu gleichen Massen gehören, und berechnet aus solchen „Dubletts" die Massenwerte selbst. Dieses Verfahren nennt man D. Die wichtigsten Grund-Dubletts der Massenspektrographie sind die Dubletts:

Massenzahl	≈ 2	$H_2 - D$	1,547	TME
„	≈ 6	$D_3 - C^{++}$	42,32	TME
„	≈ 16	$CH_4 - O$	36,41	TME

Aus diesen drei Dubletts erhält man drei Gleichungen für die genauen *Isotopengewichte von ^1H, ^2D und ^{12}C ($O = 16{,}000$ ist definitionsgemäß gegeben), woraus diese berechnet werden können. [1]
engl.: doublet method
franz.: méthode du doublet
Lit.: H. Ewald u. H. Hinterberger, Massenspektroskopie, Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr., 1953.

Dubna, s. Nachtrag.

Dumontit. Gelbes, sekundäres, bleihaltiges Uranmineral mit ca. 56 % UO_3-Gehalt. [24]
engl.: dumontit
franz.: dumontite

Duralumin. Geschützte Bezeichnung für eine Aluminium-Mehrstofflegierung, die z. B. 3,5 bis 5,0 % Kupfer, 0,2 bis 2,5 % Magnesium, 1,5 % Silizium und 0,3 bis 1,5 % Mangan enthalten kann. Diese Legierung und ihre Varianten, die zum Teil noch etwas Nickel oder Eisen enthalten, sind auch noch unter zahlreichen anderen Bezeichnungen, im Ausland z. B. unter dem Namen Avional bekannt. Die Legierung ist kalt- und warmaushärtbar und erreicht dabei hohe Festigkeitswerte (*Aushärtung). [4]

Durchbrennen, die plötzliche Überhitzung wassergekühlter Oberflächen. Dieser Effekt entsteht dadurch, daß bei zu hoher Wärmebelastung sich plötzlich ein Dampffilm an der gekühlten Oberfläche bildet. Damit vermindert sich die Wärmeübergangszahl der Oberfläche sehr beträchtlich, was meist eine zerstörende

Überhitzung des Materials zur Folge hat. S. Kanalüberhitzung und Kühlkanal, gefährdeter. [8]
engl.: burn-out
franz.: fondre (par accident, quand une pellicule de vapeur altère la transmission de chaleur), percer

Durchfluß (Durchsatz). Man versteht unter D. meist das Fördergewicht oder manchmal das Fördervolumen einer Maschine (z. B. Pumpe), Anlage (z. B. Reaktor) oder einer Leitung (z. B. Brennstoffkanal).
Bei konstanter mittlerer spezifischer Wärme eines Gases oder einer Flüssigkeit, berechnet sich die Kühl- oder Heizleistung im Reaktor oder im Wärmetauscher als Produkt von D., spezifischer Wärme und Temperaturerhöhung. [8]
engl.: flow (mass flow)
franz.: débit

Durchflußzähler, 1. im Sinne von *Gasdurchflußzählrohr, 2. ein Zählrohr, mit dem Aktivitäten von Flüssigkeiten oder Suspensionen nachgewiesen werden sollen, und bei dem diese Flüssigkeiten entweder durch das Zählrohr hindurch oder um das Zählrohr herumströmen. Ein D. dieser Art kann beispielsweise durch zwei konzentrische Rohre gebildet werden. Die Flüssigkeit strömt durch das innere Rohr, dessen Außenseite gleichzeitig die Anode des Zählrohres bildet, während das äußere Rohr das Zählrohrvolumen begrenzt und die Kathode auf der Innenseite trägt. [6]
engl.: flow counter
franz.: compteur à flux continu

Durchlaßwahrscheinlichkeit, s. Bremsnutzung.

Durchlauf-Zentrifuge, s. Gaszentrifuge.
engl.: concurrent centrifuge
franz.: centrifugeuse à courants parallèles

Durchmesser, gleichwertiger. Um die an Kreisrohren gewonnenen Wärmeübergangsgleichungen auf Kühlkanäle mit anderen Querschnittsformen anwenden zu können, hat man in den dimensionslosen Kennzahlen den Durchmesser durch den „hydraulischen Durchmesser“

$$D_{\text{hyd}} = 4\,F/U$$

zu ersetzen, wobei F der durchströmende Querschnitt

des Kanals und U der benetzte Umfang des Querschnitts ist. Sind benetzter und wärmedurchströmter Umfang nicht gleich, so wird z. T. der „thermische Durchmesser"

$$D_{th} = 4\,F/U_{th}$$

verwendet, worin U_{th} der wärmedurchströmte Teil des Umfangs ist. Bei ungewöhnlichen Querschnittsformen, wie sie teilweise bei Reaktoren vorkommen, ist dieses Verfahren nicht ganz befriedigend und es empfiehlt sich z. B. bei Ringrohren mit wärmeisolierter Außenfläche besondere, für diesen Fall entwickelte Wärmeübergangsgleichungen zu benützen. Ebenso versagt dieses Rezept bei der Kühlung mit flüssigen Metallen. Bei der Berechnung von *Druckverlusten in turbulenten Rohrströmungen ist die Verwendung des „hydraulischen Radius" oder „Profilradius" üblich. [5]

engl.: equivalent diameter

franz.: diamètre équivalent

Lit.: Gröber, Erk, Grigull, Wärmeübertragung, 3. Aufl., Springer, Berlin, 1955.

E

E 443. Bezeichnung für den ersten großen britischen Schwerwasser-Materialprüfreaktor, später umbenannt in *DIDO. [24]

EAES. Abk. für *Europäische Atomenergie-Gesellschaft (European Atomic Energy Society). [24]

EBR-1. Abk. für Experimental Breeder Reactor No. 1, den ersten Versuchsreaktor im *Brutreaktor-Programm der amerikanischen Atomenergiekommission in der *National Reactor Testing Station, Arco. Schneller, heterogener Reaktor, auf 90 % U-235 angereichertes Uran als Brennstoff, flüssiges Natrium-Kalium als Kühlmittel (kein Moderator), 1400 kW Wärmeleistung, ca. 200 kW elektrische Leistung. Konstruiert von *Argonne Nat. Lab. und Austin Co., Kosten 5,2 Mill. $ (davon 2,7 für Bau ohne Brennstoff, 2,5 für Entwicklung). In Betrieb von Dezember 1950 bis November 1955 (Defekt). Erzeugte 1951 als erster Reaktor der Welt elektrischen Strom. [24]

EBR-2. Abk. für Experimental Breeder Reactor No. 2. Schneller *Brutreaktor für Versuchskraftwerk im Fünfjahresprogramm der AEC. Auf 45 % U-235 (150 kg) oder mit 24 % Pu (90 kg) angereichertes Uran als Brennstoff, flüssiges Natrium als Kühlmittel (kein Moderator). 62 500 kW Wärmeleistung, 17 500 kW elektrische Leistung, Kosten für Reaktor 15,3 Mill. $, Gesamtanlage 40 Mill. $. Zur Zeit im Bau für Fertigstellung 1959 in der *National Reactor Testing Station, Arco. [24]

EBWR. Abk. für Experimental Boiling Water Reactor. *Siedewasserreaktor (mit einem Kühlkreis) für Versuchskraftwerk im Fünfjahresprogramm der AEC. Auf 1,4 % U-235 angereichertes Uran als Brennstoff, Wasser als Moderator und Kühlmittel. 20 000 kW Wärmeleistung, 5000 kW elektrische Leistung. Kosten für Reaktor 3,6 Mill. $, Gesamtanlage 20 Mill. $. In Betrieb seit 1. Dezember 1956 beim *Argonne Nat. Lab., Lemont. Gebaut durch *ANL und Babcock & Wilcox Co. [24]

EC *(electron capture)*, gelegentlich gebrauchte Abk. für die als *K-Einfang bezeichnete radioaktive Zerfallsart. [3]

EDF. Bezeichnung für die von der französischen staatlichen Elektrizitätsbehörde (Electricité de France) geplanten Atomkraftwerke.
EDF-1, gasgekühlter Reaktor mit natürlichem Uranmetall als Brennstoff, Graphit als Moderator. Zwei Reaktoren mit zusammen ca. 300 000 kW Wärmeleistung, 60 000 kW elektrische Leistung. Baubeginn vorgesehen 1957 für Fertigstellung 1960 bei Candes (Indres et Loire).
EDF-2, Schwesterwerk gleicher Konstruktion und Größe mit Baubeginn 18 Monate später als EDF-1 in Chinon (Loire). [24]

EDTA, aus dem Englischen stammende Abk. für Äthylendiaminotetraessigsäure. EDTA ist ein Komplexbildner, der die Ausscheidung von inkorporierten radioaktiven Substanzen aus dem Körper fördert. [28]

Effekt, 3,5-Tage-, stellt die Überlebenszeit von Mäusen nach einer kurzzeitigen Röntgenbestrahlung mit Strahlendosen zwischen 1000 und 13 000 r dar. Bei

einer Erhöhung der Strahlendosis über 13 000 r nimmt die Überlebenszeit der Mäuse stark ab (einige Minuten bis Sekunden), andererseits steigt sie bei Strahlendosen unter 1000 r stark an (11 Tage bei 500 r). Bei Meerschweinchen erstreckt sich der Konstanzbereich von 1000 bis 5000 r, bei Ratten von 800 bis 12 000 r, wobei die Überlebenszeit bei Meerschweinchen ca. 5, bei Ratten ca. 3 Tage beträgt. [28]

engl.: 3.5 days effect

franz.: effet de 3,5 jours

Lit.: B. Rajewsky, Strahlendosis und Strahlenwirkung, Thieme-Verlag, Stuttgart, 1954.

Effekt, direkter. Die in einem Lösungsmittel aufgelösten Moleküle werden bei Bestrahlung mit energiereicher Strahlung von dem einfallenden Teilchen oder Quant direkt getroffen und können nur unter dieser Bedingung eine Reaktion auslösen. Dieser E. ist von der Konzentration des gelösten Stoffes abhängig. Der direkte Effekt der ionisierenden Strahlung ist in den meisten untersuchten Systemen sehr klein und wird in vielen Fällen vom indirekten Effekt überdeckt. [18]

engl.: direct effect

franz.: effet direct

Effekt, indirekter. Bei Bestrahlung mit ionisierenden Strahlen wird die Energie eines Teilchens oder Quantes von dem Lösungsmittel aufgenommen und dem gelösten Stoff in irgendeiner Weise zugeführt, so daß erst jetzt eine Reaktion eintreten kann. Dieser E. ist in bestimmten Bereichen von der Konzentration des gelösten Stoffes unabhängig. [18]

engl.: indirect effect *franz.: effet indirect*

Eichfaktoränderungen zwischen Neutronenmeßwerten und jeweils interessierenden physikalischen Kenngrößen wie Gesamtwärmeleistung, lokale Temperatur- und Wärmebelastung an Spitzenlastpunkten, Strahlungsintensitäten an Experimentierorten und dergl. Die genannten E. können u. U. so groß werden, daß dadurch die Vorteile der Neutronenmessung praktisch aufgehoben werden. Das gilt besonders für das Sicherheitssystem, wo sie zu untragbar großen Toleranzabständen zwischen der Normalleistung und der maximal zulässigen Grenzleistung führen können, falls man

nicht zusätzliche Temperaturmessungen und dabei sich ergebende Vergrößerungen der Grenzperiode in Kauf nehmen will. Infolge der E. eignen sich die Neutronenmessungen im allgemeinen weniger zu absoluten Leistungsmessungen als zur schnellen Anzeige schneller Änderungen des Relativwerts der Leistung bzw. der dazu proportionalen stationären Temperaturen.

Eichfaktoränderungen

Die E. beruhen, abgesehen von Empfindlichkeitsänderungen der Meßgeräte, auf Verzerrungen der ursprünglichen Neutronenflußverteilung, wodurch sich veränderte Proportionalitätsfaktoren zwischen einzelnen Punkten bzw. gegenüber den Mittelwerten ergeben. Infolgedessen wird a) das Verhältnis zwischen Meßwert und Gesamtleistung und b) das Verhältnis zwischen Gesamtleistung und Maximaltemperaturen sowie der Ort der letzteren geändert. Effekt a) läßt sich verhältnismäßig leicht durch Leistungsmessungen am Gesamtkühlstrom nachweisen und von Hand oder automatisch ausgleichen. Das eigentliche Problem der E. liegt bei Effekt b), weil die Teilkühlströme der Brennelemente zur Erzielung eines guten Gesamtwirkungsgrades fast immer so ausgelegt werden, daß überall etwa die gleiche Erwärmung des Kühlmittels auftritt. Neutronenflußverzerrungen bei gleicher Gesamtleistung haben dann unvermeidlich lokale Überbelastungen an einigen Stellen zur Folge, die nur mit weiteren lokalen Temperatur- oder Leistungsmessungen nachgewiesen werden können.

Als Ursache für die zu den E. führenden Neutronenflußverzerrungen kommen alle Änderungen des Reaktorzustandes während des laufenden Betriebes in Frage. Die wichtigsten sind a) ungleichmäßige Änderungen der Spaltstoff- und Vergiftungskonzentration infolge der verschieden starken Flüsse an verschiedenen Punkten des Reaktors (dieser Effekt kann als lokale k_∞-Änderung aufgefaßt werden), b) Änderungen der effektiven Randbedingungen bei Verstellungen von Steuerorganen (Absorberstäbe, Moderatorspiegel) oder c) bei Einführung von stark absorbierenden Bestrahlungsobjekten (Prüfkanäle, Isotopenbestrahlung). Gegen a) hilft die Verwendung guter Reflektoren, durch die die Flußverteilung in der Spaltzone abgeflacht

wird. Einfluß b) läßt sich durch Aufteilung auf möglichst viele Steuerorgane vermindern. Die Änderungen c) können dagegen, besonders bei großen Prüfkanälen, nicht verhindert werden. Das Auftreten größerer E. läßt sich deshalb verhältnismäßig leicht bei reinen Kraftwerksreaktoren vermeiden, am wenigsten dagegen bei großen Materialprüfungs- und Forschungsreaktoren. [9]

engl.: calibration factor variation

franz.: variation des facteurs de référence

Lit.: The Reactor Handbook; Vol. 2; Engineering; p 87 ff., McGraw-Hill, New York, 1955.

Eigenfilterung. Die von der Antikathode der Röntgen-Röhre ausgehende Röntgen-Strahlung wird bereits vor ihrem Austritt aus der Röhrenhaube (Austrittsfenster) durch die Glaswand der Röhre selbst, sowie gegebenenfalls durch Kühl- oder Isolationsmittel (Öl etc.) vorgefiltert. Hierbei werden die weichsten Strahlenanteile mehr oder weniger bevorzugt absorbiert. Dieser Eigenfilterwert wird je nach Härte der Strahlung (und je nach Bauart der Röhre) in Be-, Cellon-, Aluminium- oder Kupfer-Äquivalenz angegeben. [28]

Eigenfunktion, s. Eigenwertprobleme.

engl.: eigenfunction

franz.: fonction propre

Eigenspannungen. Spannungen in einem metallischen Werkstoff durch unterschiedliche Längenänderungen und Verzerrungen in einzelnen Bereichen. Sie können durch inhomogene plastische Verformung, durch unterschiedliche Verformung verschieden orientierter Kristallite und durch Gitterfehlstellen hervorgerufen werden. Die Wirkung von E. ist dieselbe wie die von äußeren Kräften hervorgerufenen Spannungen; dies ist besonders hinsichtlich der *Spannungskorrosion zu beachten. – E. können röntgenographisch aus der Verschiebung und Verbreiterung von Debye-Scherrer-Linien bestimmt werden. [4]

engl.: internal stress

franz.: tension interne

Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkunde, Springer, Berlin, 1950. – R. Glocker, Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, 3. Aufl., Springer, Berlin, 1949.

Eigenwert, s. Eigenwertprobleme.
engl.: eigenvalue
franz.: valeur propre

Eigenwertprobleme treten in der Physik meistens in der Form von linearen homogenen gewöhnlichen oder partiellen Differentialgleichungen für eine Funktion $f(x_1, x_2, \ldots x_n)$ auf, die in einem bestimmten Bereich gelten. Die Gleichungen enthalten einen gewissen Parameter λ, der physikalisch etwa eine Frequenz, Energie oder dgl. bedeuten kann. Es sind Werte für $f(x_1, \ldots x_n)$ auf dem Rand des Bereichs vorgeschrieben (Randbedingungen). Das E. besteht darin, eine nicht identisch verschwindende Funktion f, die Eigenfunktion, zu finden, die der Differentialgleichung und den Randbedingungen genügt. Das geht im allgemeinen nicht für jedes λ, sondern nur für spezielle, die sog. Eigenwerte. Zum Beispiel können Eigenwerte einer Gleichung die ganzen Zahlen sein (diskrete Eigenwerte), oder jede Zahl oberhalb einer bestimmten Grenze (kontinuierlicher Eigenwert). Eine einfache Eigenwertgleichung mit einer Veränderlichen ist z. B. die Differentialgleichung für die schwingende Saite $f''(x) = -\lambda \cdot f(x)$. Die Gleichung gilt im Bereich $0 \leqq x \leqq a$ mit der Randbedingung

$$f(0) = f(a) = 0\ ;$$

a ist die Länge der Saite. Die Randbedingungen bedeuten, daß die Saite an ihren Enden eingespannt, also dort nicht schwingungsfähig ist. Die Lösung des E.s ist $f = c \cdot \sin \sqrt{\lambda} \cdot x$ mit $\lambda = \pi^2 n^2/a^2$ $(n = 1, 2, 3 \ldots)$, λ, mitunter auch n, bezeichnet man als Eigenwert des Problems. Er gibt die Schwingungen an, die bei einer Saite der Länge a möglich sind. Die halbe Wellenlänge hängt mit λ zusammen über $l/2 = \pi/\sqrt{\lambda}$. – E. treten nicht nur in der Form von Differentialgleichungen auf. Auch eine Integral- oder Matrizengleichung kann ein E. sein. [7]

engl.: eigenvalue problems
franz.: problèmes des valeurs propres

Lit.: A. Sommerfeld, Vorl. über theor. Physik, Bd. 6, Part. Diff. Gleichungen der Physik, Dieterich, Wiesbaden, 1948. – Courant-Hilbert, Methoden der math. Physik, Springer, Berlin, 1931.

Eigenwertspektrum ist die Gesamtheit der Eigenwerte eines Eigenwertproblems. [7]
engl.: eigenvalue spectrum
franz.: spectre des valeurs propres

Eigenzustand. Diejenigen Zustände eines physikalischen Systems, z. B. eines Atoms, die durch eine Eigenfunktion beschrieben werden, nennt man E. [7]
engl.: eigenstate *franz.: état propre*

Eindampfen, s. Verdampfen.
engl.: evaporation *franz.: évaporation*

Einfachstreuung. Das Teilchen erlebt auf einer bestimmten endlichen Wegstrecke nur einen einzigen Streuakt. Gegensatz *Vielfachstreuung. Ob ein Teilchen einmal oder vielmals gestreut wurde, ist z. B. bei der Auswertung von Bahnspuren auf Photoplatten und Nebelkammeraufnahmen sowie in der Theorie der Abschirmung von Bedeutung. [7]
engl.: single scattering *franz.: diffusion unique*

Einfallsdosis, s. Dosis.
engl.: skin surface dose in air
franz.: dose incidente

Einfang, i. a. syn. zu *Absorption, in der Neutronenphysik ist man in internationaler Übereinkunft bestrebt, E. speziell für (n, γ)-Prozesse zu gebrauchen, dagegen Absorption für (n, γ)- und (n, p)-, (n, α)-, ... sowie Spaltungsprozesse. [7]
engl.: capture *franz.: capture*

Einfang, radioaktiver. Unter dem r. E. versteht man den E. eines Elektrons aus der Elektronenhülle (meist aus der K-Schale (*K-Einfang), seltener aus der L-Schale (L-Einfang) durch deren Atomkern. Hierdurch vermindert sich die Kernladungszahl um eine Einheit bei gleichbleibender Massenzahl. [28]
engl.: radioactive capture
franz.: capture radioactive

Einfangsquerschnitt, Wirkungsquerschnitt für den Strahlungseinfang, s. a. Absorptionsquerschnitt.

Einfluß. 1. Allgemein. Im Reaktor spielen Neutronen verschiedener Energie eine unterschiedliche Rolle. Außerdem ist das Gewicht der einzelnen Reaktorzonen verschieden (so ist z. B. die Wirksamkeit eines Regelstabes von seiner Lage im Reaktor abhängig). Diese

für die Reaktorkinetik und die Störungsrechnung wichtigen Umstände bestimmen den Wert eines an einer bestimmten Stelle im Reaktor befindlichen Neutrons bestimmter Energie im Hinblick auf den Fortgang der Kettenreaktion. Wird z. B. in einen kritischen Reaktor an der Stelle $\mathfrak{r}$ eine Anzahl Q_0 Neutronen der Energie E eingesetzt, so steigt die Leistung des Reaktors an und strebt einem neuen Niveau zu (s. Spalt-Erwartung, asymptotische). Die Vermehrung des Neutroneninhalts ist eine Funktion von E und $\mathfrak{r}$. Sie wird als *Einflußfunktion bezeichnet.

2. Relativer E. Unter dem relativen E. von Reaktorneutronen der Sorte A auf Reaktorneutronen der Sorte B versteht man die Zahl der Neutronen der Sorte A, welche notwendig ist, um ein der Sorte B verlorengegangenes Neutron aus Neutronen der Sorte A zu ersetzen, ohne daß sich der Zustand der Kettenreaktion im Reaktor ändert (A und B mögen bestimmte Energiewerte oder den Ort der Neutronen darstellen). [7, 13]

engl.: importance

franz.: importance, influence

Einfluß des Neutronenspektrums. Das Energiespektrum $f_i(E)$ der verzögerten *Neutronen aus der i-ten Gruppe unterscheidet sich vom Energiespektrum $f_0(E)$ der prompten Neutronen. (Die verzögerten Neutronen haben ein Linienspektrum!) Diese Tatsache wirkt sich dahingehend aus, daß der Einfluß der verzögerten Neutronen auf den Gang der Kettenreaktionen sich etwas von dem der prompten unterscheidet. Man kann dem durch den Faktor

$$\varepsilon_i = \frac{\iint \Phi^\dagger(\mathfrak{r}, E)\, \boldsymbol{J}_i\, \Phi(\mathfrak{r}, E)\, \mathrm{d}E\, \mathrm{d}V}{\iint \Phi^\dagger(\mathfrak{r}, E)\, \boldsymbol{J}\, \Phi(\mathfrak{r}, E)\, \mathrm{d}E\, \mathrm{d}V}$$

Rechnung tragen. Dabei bedeutet $\Phi^\dagger$ die *Einflußfunktion. Der Gewinnoperator $\boldsymbol{J}$ ist durch

$$\boldsymbol{J} = \nu\, f(E) \int_0^\infty \mathrm{d}E'\, \Sigma_f(E')$$

definiert, wobei $f(E)$ das Brutto-Energiespektrum der Spaltneutronen bedeutet. Der Operator $\boldsymbol{J}_i$ ist genau so, jedoch mit $f_i(E)$ zu bilden. Der Faktor ε_i spielt in der

*Reaktorkinetik eine Rolle. In manchen Fällen kann man näherungsweise $\varepsilon_i \approx 1$ setzen. [13]
engl.: importance of neutron spectrum
franz.: importance du spectre neutronique

Einflußfunktion. 1. Definition. Die E. ist ein Maß für den *Einfluß eines bestimmten Neutrons auf den Ablauf der Kettenreaktion in einem Reaktor. Es ist unmittelbar klar, daß dieser Einfluß orts- und geschwindigkeitsabhängig ist, denn ein Neutron am Rande eines Reaktors hat eine größere Wahrscheinlichkeit, aus dem Reaktor herauszudiffundieren, als sich an der Kettenreaktion weiter zu beteiligen, während ein Neutron im Inneren sich umgekehrt auswirkt. Ein thermisches Neutron ist im allgemeinen mehr wert als ein schnelles. Wird ein Reaktor der kritischen Größe durch ein Neutron am Rande gezündet, so stellt sich ein niedrigerer Neutroneninhalt $1/v \int \Phi \, dV$ ein als bei Zündung von Innenraum. Dieser vom Zündort und der Geschwindigkeit des zündenden Neutrons abhängige Neutroneninhalt ist die E. Bezieht man sie auf ein Neutron, so ergibt sich

$$\Phi^{\dagger}(\mathfrak{r}, E) = \frac{1}{Q_0} \int_R \int_0^{\infty} \frac{1}{v'} \, \Phi_{\infty}(\mathfrak{r}' E') \, dE' \, dV' .$$

Unter Φ_{∞} ist dabei der durch das Einsetzen von Q_0-Neutronen der Energie E am Ort $\mathfrak{r}$ zusätzlich hervorgerufene Fluß nach hinreichend langer Zeit zu verstehen. (In der amerikanischen Literatur bezeichnet man z. T. das Produkt aus $\Phi^{\dagger}$ und der Neutronen-Lebensdauer l als E.)

2. Mathematische Darstellung. Mit Hilfe der *Transporttheorie läßt sich allgemein zeigen, daß die energieabhängige E. eines Neutrons bis auf einen Faktor die zum energieabhängigen Vektorfluß $\Phi(\mathfrak{r}, E)$ adjungierte Funktion ist, wobei der Vektorfluß $\Phi(\mathfrak{r}, E)$ den stationären Zustand des Reaktors beschreibt.

Durch Mittelung über alle Richtungen läßt sich die Transporttheorie in die Diffusionstheorie überführen. Daher gilt der obige Satz auch in diffusionstheoretischer Näherung, etwa in der Gruppendiffusionstheorie.

Beschreibt man die stationäre Kettenreaktion eines Reaktors durch ihre *Matrixdarstellung, so ist die E. eines Neutrons gleich der zum Matrixfluß gehörenden adjungierten Matrixfunktion.

Sie gehorcht der zur Reaktorgleichung *adjungierten Gleichung:

$$(\boldsymbol{J}^{\dagger} - \boldsymbol{K}^{\dagger})\, \Phi^{\dagger} = 0\,,$$

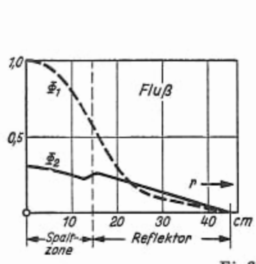
wobei die Operatoren $\boldsymbol{J}^{\dagger}$ und $\boldsymbol{K}^{\dagger}$ durch

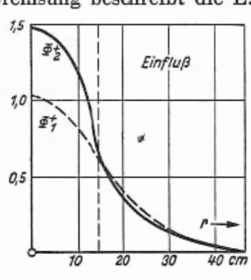
$$\boldsymbol{J}^{\dagger} = \nu\, \Sigma_f(E) \int\limits_0^{\infty} \mathrm{d}E'\, f(E') \quad ,$$

$$\boldsymbol{K}^{\dagger} = -\nabla \cdot D\, \nabla + (\Sigma_e + \Sigma_f + \Sigma_s) - \\ - \Sigma_s(E) \int\limits_0^{\infty} \mathrm{d}E'\, g(E \to E')$$

definiert sind (s. Reaktorgleichung in Diffusionsnäherung). Die E. muß im Innern des Reaktors überall endlich, stetig und positiv sein. An Grenzflächen ist die Stetigkeit des Einfluß-Stroms zu fordern. Am Rand gegen das Vakuum muß $\Phi^{\dagger}$ Null werden, außerdem muß der Einfluß-Strom in das Vakuum verschwinden, da Neutronen, die in das Vakuum austreten, keinen Einfluß auf die späteren Kettenreaktionen haben. Ist die Reaktorgleichung *selbstadjungiert (z. B. bei speziellen nackten Reaktoren), so ist $\Phi^{\dagger} \sim \Phi$.

Zwischen der Reaktorgleichung und der Einfluß-Gleichung bestehen merkwürdige Beziehungen. Während Neutronen aus dem Reaktor ausströmen, strömt Einfluß ein. An Stelle einer Bremsung beschreibt die E.





Einflußfunktion

eher eine Beschleunigung. Schließlich tritt in der E. ein „Spaltquerschnitt“ $f(E)$ und ein „Spaltspektrum“ $\Sigma_f(E)$ auf. Wegen dieser Inversion nennt man das durch die E. beschriebene hypothetische System mitunter einen „adjungierten Reaktor“. Die E. spielt als *Gewichtsfunktion bei *Reaktor-Störungsrechnungen eine wichtige Rolle. Außerdem kann man mit ihrer Hilfe eine Formulierung der *Reaktor-Kinetik geben, die sich an die Störungsrechnung anschließt.

Die Abb. bringt die E. eines kugelförmigen homogenen Leichtwasser-Reaktors mit Reflektor im Vergleich zum Neutronenfluß. Die Berechnung wurde nach der *Zweigruppen-Diffusionsmethode durchgeführt. Der thermische Einfluß überwiegt im Reaktorinnern, da ein thermisches Neutron eine größere Chance hat, zu spalten und damit die Kettenreaktion zu erhalten, als ein schnelles, das während des Bremsvorganges absorbiert werden, oder auf dem Umweg über den Reflektor verlorengehen kann. Im Reflektor stimmen schneller und thermischer Einfluß weitgehend überein, da ein schnelles Neutron aus dem Reflektor thermisch sein wird, bis es die Spaltzone erreicht und dann den gleichen Einfluß hat wie die aus dem Reflektor rückströmenden thermischen Neutronen.

3. Bedeutung der E. $\Phi^\dagger$. Durch Multiplikation der allgemeinen Diffusionsgleichung (s. Gl. [1, 2] bei Neutronendiffusion) mit der orts- und energieabhängigen Einflußfunktion $\Phi^\dagger$ wird jedes Neutron in der Kettenreaktion gerade mit dem Gewichtsfaktor multipliziert, mit dem es an deren Aufrechterhaltung beteiligt ist. Durch Bildung des Integrals $\iint \mathrm{d}V\,\mathrm{d}E$ von der so gewonnenen Gleichung über den gesamten Reaktorraum einschließlich Reflektor gewinnt man eine raum- und energieunabhängige, nur zeitabhängige Darstellung der Reaktorgleichung. Sie hat unter Berücksichtigung der verzögerten Neutronen die Form

$$\frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = (k'-1)\Sigma_a'\cdot\varphi - k'\beta'\Sigma_a'\varphi + \Sigma_i \lambda_1 c_i' + q$$

$$\frac{\mathrm{d}c_i'}{\mathrm{d}t} = -\lambda_i c_i' + k'\beta_i'\Sigma_a'\cdot\varphi$$

Dieses Gleichungssystem ist formal identisch mit dem durch einfache Volumenintegration der Gl. (4) bei Neutronendiffusion zu gewinnenden Gleichungssystem. Die Größen φ und c' haben jedoch eine allgemeinere Bedeutung.

4. Störungstheorie. Jede Störung im Neutronenfluß wird durch Änderung der Quellen und Senken im Reaktor hervorgerufen, was zur Änderung von k_{eff} führt. Diese kann mit Hilfe der E. des ungestörten Problems in erster Näherung in folgender Weise berechnet werden:

$$\delta k_{eff} = \frac{\iint \Phi^{\dagger}\, \delta[\boldsymbol{J}-\boldsymbol{K}]\, \Phi \, \mathrm{d}E\, \mathrm{d}V}{\iint \Phi^{\dagger}, \boldsymbol{K}\Phi \, \mathrm{d}E\, \mathrm{d}V}$$

$\delta[\boldsymbol{J}-\boldsymbol{K}]$ bedeutet die Störung der Quellen $\boldsymbol{J}$ und der Senken $\boldsymbol{K}$ in Funktion des Ortes.

S. a. Reaktorgleichung, allgemeine, R. in Diffusionsnäherung, kinetische Gleichungen, Reaktorstörungsrechnung. [7, 13]

engl.: importance function

franz.: fonction d'importance

Lit.: H. Grümm u. K. H. Höcker, Die Einflußfunktion (importance function) in der Reaktorkinetik, Z. angew. Phys. 9, 305, 1957. – H. Grümm u. K. H. Höcker, Reaktorkinetik und Störungstheorie, Erg. ex. Naturwiss. 30, Springer, Berlin, 1958. – L. N. Usachoff, Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. V, S. 503 ff., Genf, 1956. – Reactor Handbook, Vol. I, Physics, Kap. VI, McGraw-Hill, New York, 1955.

Eingruppenmodell, Eingruppentheorie. Behandelt man das Verhalten von Neutronen aus allen Energiebereichen so, als ob sie alle einem einzigen mit mittleren Eigenschaften angehörten, so spricht man von einem Eingruppenmodell, durch das man den komplizierten Sachverhalt approximiert. Den mathematisch-physikalischen Inhalt dieses Modells einschließlich der Approximation bezeichnet man als Eingruppentheorie oder Eingruppenmethode. Das Verfahren bedeutet meist eine grobe Schematisierung der wirklichen Verhältnisse. Es wird bei der Beschreibung der Neutronendiffusionen im thermischen Reaktor zum Zwecke einer ersten Orientierung verwandt. Eine wesentlich bessere Näherung ist das *Zweigruppenmodell.

Beim thermischen Reaktor sind die thermischen Neutronen die am meisten bestimmenden. Daher besteht

Eingruppenmodell, Eingruppentheorie

die E. primär in der Beschreibung der Diffusion der thermischen Neutronen:

$$D \cdot \Delta \Phi - \Sigma_a \Phi + S = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} \tag{1}$$

$\Phi = \Phi(\mathfrak{r}, t)$ ist der Neutronenfluß, $D = \lambda_t/3$ die Diffusionskonstante, Σ_a der makroskopische Absorptionsquerschnitt, S der Quellterm, v die mittlere thermische Geschwindigkeit. Beim stationären Betrieb ist $\partial \Phi / \partial t = 0$. Eine wesentliche Aufgabe ist die Berechnung des Quellterms. Sie kann in verschiedener Näherung geschehen. Es ist konsequent, so zu tun, als ob die Neutronen mit thermischer Energie entstünden. In diesem Fall ist für einen homogenen Reaktor

$$S = f \cdot \eta \cdot \Sigma_a \cdot \Phi \tag{2}$$

(f Bruchteil der Neutronen, die in spaltbarer Substanz [^{235}U] absorbiert werden, η Zahl der entstehenden Neutronen, bezogen auf ein in spaltbarer Substanz [^{235}U] absorbiertes Neutron).

Eine bessere Approximation bietet die Annahme, daß die Neutronen als schnelle entstehen und kontinuierlich gebremst werden (F e r m i sche *Alterstheorie). In diesem Fall ist bei nackten Reaktoren

$$S = f \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot \Sigma_a \cdot \Phi \cdot e^{-B^2 \tau} = k \cdot \Sigma_a \cdot \Phi \cdot e^{-B^2 \tau} \tag{2 a}$$

(ε Faktor zur Erfassung der Vermehrung durch schnelle Spaltungen, p Bremsnutzung, k Vermehrungsfaktor, $e^{-B^2 \tau}$ Wahrscheinlichkeit, daß das Neutron während des Bremsprozesses nicht aus dem Reaktor herausdiffundiert, B die materiell bedingte Flußwölbung). B^2 wird bestimmt aus

$$\frac{k \cdot e^{-B^2 \tau}}{1 + L^2 B^2} = 1 \,. \tag{3}$$

Der Fluß folgt dann aus $\Delta \Phi + B^2 \Phi = 0$. (4)

Für einen kugelförmigen nackten Reaktor (Radius R) heißt die Lösung

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \frac{\sin \pi r/R}{r} \text{ mit } B = \frac{\pi}{R} \tag{5}$$

aus (3) und (5) folgt der kritische Radius R. –

Wenn der Reaktor einen Reflektor hat, ist an der Stelle R der Fluß im Inneren an den Fluß im Reflektor an-

zuschließen. In der Formel (2 a) entfällt dann der Faktor $e^{-B^2 \tau}$.

Für die in (1) eingehenden *Gruppenkonstanten D, Σ_a, k werden entweder die Wirkungsquerschnitte für die häufigste Neutronengeschwindigkeit (2200 m/s) oder gewogene Mittelwerte aus dem Energieintervall $0 < E < 0{,}17$ eV zugrunde gelegt. Das letztere empfiehlt sich insbesondere dann, wenn man zu einer Verfeinerung der Rechnung durch eine Zweigruppentheorie kommen will. [7]

engl.: one group model, ~ theory

franz.: modèle monogroupe, théorie ~

Lit.: F. Cap, Physik und Technik der Atomreaktoren, Springer, Wien, 1957. – R. L. Murray, Reactor Physics, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1957. – S. Glasstone u. M. C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, McMillan, London, 1952.

Einheiten, atomare sind von Hartree in die Mikrophysik eingeführte Einheiten, die bezwecken, unbequeme Faktoren zu ersparen. Man wählt als a. E. der Ladung: die Elementarladung

$e = 4{,}803 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische CGS-Einheiten;

a. E. der Masse: die Elektronenmasse

$$m = 0{,}9108 \cdot 10^{-27}\ \text{g};$$

a. E. der Länge: den Radius der ersten Bohrschen Kreisbahn im Wasserstoffatom:

$$a = \frac{h^2}{4\,\pi^2\,m\,e^2} = 0{,}5292 \cdot 10^{-8}\ \text{cm};$$

a. E. der Zeit: $1/2\,\pi$ der Umlaufzeit des Elektrons auf der ersten Bohrschen Kreisbahn;

$$t_0 = \frac{8\,\pi^3\,m\,e^4}{h^3} = 2{,}419 \cdot 10^{-17}\ \text{s}\,.$$

In diesen a. E. wird z. B. der Drehimpuls des Elektrons infolge seines Spins $^1/_2$, sein Bahn-Drehimpuls auf der ersten Bohrschen Bahn 1, seine kinetische Energie $^1/_2$, seine potentielle Energie -1, seine Gesamtenergie (Ionisierungsenergie des Wasserstoffatoms) $-\,^1/_2$, und die Schrödinger-Gleichung des Wasserstoffatoms nimmt die einfache Form an:

$$\Delta u + 2\left(E + \frac{1}{r}\right)u = 0\,.$$

Dagegen wird die Lichtgeschwindigkeit in diesen a. E. gleich der reziproken S o m m e r f e l d schen Feinstrukturkonstanten $1/\alpha = 137$ und das B o h r sche Magneton $= \alpha/2$.

Die H a r t r e e schen a. E. sind nicht mit der atomaren Masseneinheit, s. ME, zu verwechseln. [1]

engl.: atomic units *franz.: unités atomiques*

Einheiten, Hartreesche, s. Einheiten, atomare.

Einhüllung, Bezeichnung für Brennstoffumhüllung, *Hülse. [8]

Einkanal-Diskriminator, s. Diskriminator.

Einlagerungsmischkristall. Ein *Mischkristall, bei welchem sich die Atome der einen Komponente auf den *Zwischengitterplätzen des Gitters der anderen Komponente befinden. [4]

engl.: interstitial solid solution
franz.: solution solide interstitielle

Einphasendosimeter, chemisches Dosimeter, bei dem sich der durch die Strahlung hervorgerufene Umsatz und die Farbreaktion der Zersetzungsprodukte in einer Phase abspielt, z. B. HCl-Abspaltung mit Chloroform in gesättigter wäßriger Lösung. [18]

engl.: single phase dosimeter
franz.: dosimètre en phase unique

Einsatzspannung bei *Auslösezählern ist diejenige Spannung, oberhalb derer sämtliche Impulse unabhängig von der Primärionisation annähernd gleich groß werden (Beginn des *P l a t e a u s). Die E. ist abhängig von Gasart und Gasdruck. [6]

engl.: Geiger threshold
franz.: tension minima du palier

Einschlüsse. Nichtmetallische Verunreinigungen (z. B. Oxyde, Nitride, Sulfide, Silikate usw.) innerhalb des Metalles. Die Einschlüsse können bei der Erstarrung, beim *Sintervorgang oder bei chemischen Reaktionen im festen Metall entstehen. Sie vermindern meistens durch innere Kerbwirkung die Festigkeit des Metalles. [4]

engl.: inclusions *franz.: inclusions*

Einschnürung, die Querschnittsverminderung an der Bruchstelle eines Zerreißstabes beim Zugversuch. Die E. ist ein Maß für die plastische Verformbarkeit eines Materials. Angegeben wird die prozentuale Querschnittsverminderung bezogen auf den Ausgangsquerschnitt der Probe. [4]
engl.: reduction of area, necking down
franz.: striction

Einstein-Bose-Statistik, s. Statistik, Bose-Einsteinsche.

Einsteinium, das siebente Transuran mit der Ordnungszahl 99; chemisches Symbol Es. Das E. wurde zusammen mit dem Fermium im Jahr 1953 fast gleichzeitig an drei amerikanischen Atomlaboratorien entdeckt. Das E. entsteht bei außerordentlich intensiver Neutronenbestrahlung von Uran; das Ausgangsmaterial wurde der Explosion einer Wasserstoffbombe ausgesetzt. Dabei wurden zuerst die Isotope mit den Massenzahlen 253 und 255 aufgefunden, später auch noch das E 254 und 256. Das E 253 und E 254 sind α-Strahler von etwa 20 Tagen und 320 Tagen Halbwertszeit, die anderen Isotope sind β-Strahler. Durch den Beschuß von Kalifornium-249 mit Deuteronen und von Berkelium-249 mit α-Teilchen gewann man 1957 Isotope mit den Massenzahlen von 248 bis 252. Man kennt jetzt insgesamt elf Isotope von $A = 248$ bis 258. [1, 7]
engl.: einsteinium
franz.: einsteinium

Einsteinsche Gleichung. 1. Beziehung zwischen der Frequenz ν einer Strahlung und der ihr zuzuordnenden Energie: $E = h\,\nu$ (h Plancksches Wirkungsquantum).
2. Verknüpfung der Energie mit der Masse m gemäß der speziellen *Relativitätstheorie:
$E = m\,c^2$ (c Lichtgeschwindigkeit). [7]
engl.: Einstein equation
franz.: relation d'Einstein

Einteilchenmodell (Einkörpermodell). In der Theorie des Aufbaus der Atomkerne (s. Kern) kann man näherungsweise jedes einzelne Nukleon so behandeln, als ob es sich in dem zeitlich konstanten mittleren Feld aller übrigen bewegt, ein Verfah-

ren, das der H a r t r e e schen Methode des self-consistent field in der Theorie der Elektronenhülle entspricht. In diesem Fall redet man von einem E. des Kerns, da jeweils nur einer der zahlreichen Bestandteile des Kerns als bewegt betrachtet wird. Gegensatz: Mehrkörpermodell. Die Auffassung eines Kerns als E. liegt dem *Schalenmodell der Atomkerne zugrunde. [1]
engl.: single particle model
franz.: théorie de la particule unique

Eintreffervorgang. In einem biologischen Objekt wird ein biologischer Effekt durch einen E. hervorgerufen, wenn zu seiner Erzeugung ein einziger Absorptionsakt eines Strahlenquantes oder ein Korpuskeldurchgang ausreichend ist. E.e machen sich durch eine exponentielle *Dosiseffektkurve bemerkbar. E.e hat man festgestellt bei der Inaktivierung und Mutation von Mikroorganismen durch energiereiche Strahlen. Bei den höheren Organismen erfolgen grundsätzlich die sog. Gen-Mutationen und die Chromosomenbrüche durch einen einzigen Treffer, zum mindesten, wenn man energiereiche Strahlen anwendet. S. a. Treffertheorie. [28]
engl.: single-hit
franz.: mécanisme à coup unique

Einzonenreaktor, s. Zweizonenreaktor.
engl.: one region reactor
franz.: réacteur à une seule région

Eisen (Fe). Schwermetall mit der Dichte 7,87; Ordnungszahl 26, Atomgewicht 56. Schmelzpunkt 1539 °C, Siedepunkt 2740 °C. Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen $\Sigma_a = 0{,}19\ \mathrm{cm}^{-1}$. Reines E. tritt in drei Modifikationen auf: Zwischen dem Schmelzpunkt und 1401 °C ist E. kubisch raumzentriert (Delta-Phase), zwischen 1401 °C und 906 °C kubisch flächenzentriert (Gamma-Phase, Austenit), und unterhalb 906 °C ist E. wieder kubisch raumzentriert (Alpha-E., Ferrit). Unterhalb 769 °C ist E. ferromagnetisch.
E. ist das Basismetall für die wichtigen Konstruktionswerkstoffe *Stahl und *Gußeisen. Technisches E. hat stets einen gewissen Kohlenstoffgehalt. Der schmied-

und härtbare Stahl enthält bis zu maximal 1,7 % Kohlenstoff. Gußeisen hat mehr als 1,7 % Kohlenstoff. – Die mechanischen, magnetischen und chemischen Eigenschaften des E.s können durch weitere Legierungszusätze und durch *Wärmebehandlung in weiten Grenzen variiert werden. [4]

engl.: iron
franz.: fer

Eisen 55 und 59, *radioaktive Isotope des Eisens. Radioaktive Eisenisotope wären für Verschleißmessungen an Stählen wertvoll. Allerdings gibt es nur das Eisenisotop 55, das als K-Strahler mit nur geringer Ausbeute gemessen werden kann, und das Eisenisotop 59, welches mit nur mäßiger spezifischer Aktivität in metallischer Form erhältlich ist. Für langlaufende Versuche ist auch die Halbwertszeit von 45,1 Tagen gering. Chemische ^{59}Fe-Präparate können teils durch elektromagnetische Anreicherung des Ausgangsisotops der Bestrahlungssubstanz und teils durch Ausnutzung des *Szilard-Chalmer-Effektes an $K_4Fe(CN)_6\,3\,H_2O$ in höheren spezifischen Aktivitäten gewonnen werden.

Strahlungsdaten:

	^{55}Fe	^{59}Fe
Halbwertszeit:	2,94 Jahre	45,1 Tage
Strahlung:	K-Strahlung	Beta, Gamma

Gelegentlich kann man Eisen durch ^{60}Co oder andere eisenähnliche günstige Isotope radioaktiv markieren. Abnutzungsuntersuchungen an Stählen stützen sich oftmals auf hochaktivierbare Legierungskomponenten, auch wenn sie nur in geringer Konzentration vorhanden sind. [16]

Eisen-Portland-Beton besteht aus Stahlstücken und Portlandzement. E.-P.-B. ist die Weiterentwicklung des MO-Betons. Seine Dichte ist etwa 5,8 g/cm³, seine Zusammensetzung in Gew.-%: 87,5 % Fe; 5,8 % O; 4 % Ca; Rest: H, Mg, Si, Al, Mn, S. S. Schwerbeton. [26]

engl.: iron-Portland-concrete
franz.: béton Portland au fer

Eisen-Portland-Zement

Eisen-Portland-Zement ist ein Gemisch von etwa 70 % normalem Zement und 30 % Hochofenschlacke. S. Zement. [26]
engl.: iron-Portland cement
franz.: ciment Portland au fer

Elastizitätsmodul (E-Modul). Ein Werkstoffkennwert, welcher im Bereich der elastischen Verformung den Zusammenhang zwischen der Dehnung ε und der Zugspannung σ nach dem Hookeschen Gesetz $\sigma = \varepsilon E$ angibt. Der E-Modul von Metallen liegt in der Größenordnung 10^4 kg/mm^2 (z. B. Al 7220, Be 29 280, Pb 1600, Fe 21 550, Cd 6350, Th 7000, Ti 10 520, W 41 530, Sn 5500). [4]
engl.: modulus of elasticity (in tension)
franz.: module d'élasticité

Eldorado Mining and Refining Ltd. Die staatliche kanadische Monopolgesellschaft für Uranverwertung in Kanada. [24]

Elektrolyse zur Trennung von Isotopen. Das elektrolytische Trennverfahren ist vor allem für die Anreicherung des schweren Wasserstoffs verwendet worden. Bei der E. wässeriger Lösungen bleibt der schwere Wasserstoff bevorzugt in der Lösung, während der abgeschiedene Wasserstoff an leichtem Wasserstoff angereichert ist. Die Anreicherung des schweren Wasserstoffs erfolgt nach der Rayleigh-Formel (s. Destillation). Der Trennfaktor ist durch das Zusammenwirken mehrerer Prozesse bestimmt: 1. die Beweglichkeit der Ionen im Elektrolyten, 2. die Entladung der Ionen an der Kathode zu Atomen, 3. die Molekülbildung aus den Atomen und die Desorption der Moleküle von der Kathode, 4. die *Austauschreaktion

$$H_2O + HD \rightleftarrows HDO + H_2 .$$

Die Gleichgewichtskonstante dieser Austauschreaktion ist der untere Grenzwert des Trennfaktors; bei größeren Trennfaktoren sind auch die anderen Vorgänge bei der Trennwirkung beteiligt. Elektrolytische Anreicherungen wurden auch bei anderen Isotopen (Sauerstoff, Lithium) erzielt. [14]
engl.: electrolysis for the separation of isotopes
franz.: électrolyse pour la séparation des isotopes

Elektrometer, Gerät zum Nachweis kleiner Ladungen und damit zur Messung sehr kleiner Ströme. Mit E. können die Ionisationsströme von Ionisationskammern gemessen werden. Im einfachsten Fall besteht ein E. aus einem leichten Plättchen, das einer festen Platte gegenübersteht (Blatt-E.). Bei Aufladung stoßen sich Blättchen und Platte ab, und aus der Stellung des Blättchens kann die Ladung bestimmt werden. [17]
engl.: electrometer
franz.: électromètre

Elektrometerröhre, Verstärkerröhre, die einen besonders hohen Eingangswiderstand zwischen Gitter und Kathode hat. Sie ermöglicht deshalb die Messung von sehr kleinen Strömen, z. B. von Ionisationskammern. Der hohe Eingangswiderstand wird durch besondere Isolation des Gitters und niedrige Betriebsspannungen erreicht. Die Gitterströme, die die Meßempfindlichkeit begrenzen, liegen bei guten E. in der Größenordnung von 10^{-15} A. [17]
engl.: electrometer tube
franz.: tube à électromètre

Elektromigration, s. Ionenwanderung.
engl.: electromigration
franz.: electromigration

Elektron, das negativ geladene „leichte" Elementarteilchen. Manchmal wird der Name E. auch als Sammelbegriff für das negative und das positive E. gebraucht. Hier soll er jedoch im engeren Sinn nur für das negative E. verwendet werden; das positive E. ist unter der Bezeichnung „Positron" aufgeführt.
Das E. ist durch folgende Konstanten bestimmt:

Ladung $e = 4{,}803 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische CGS-Einheiten

$= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C (Elementarladung)

Ruhmasse $m_0 = 0{,}9108 \cdot 10^{-27}$ g $= 0{,}5488$ TME

Eigendrehimpuls (Spin)

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi} = 0{,}527 \cdot 10^{-27} \text{ erg s}$$

Magnetisches Moment näherungsweise 1 B o h r sches Magneton

$$\mu_B = \frac{e\,h}{4\,\pi\,m_0\,c} = 0{,}927 \cdot 10^{-20}\ \text{Gauß cm}^3\,.$$

Nach neuesten Messungen ist $\mu_e = 1{,}00115$ B o h r-sche Magnetonen.
In den Formeln bedeutet h das P l a n c k sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit. [1]
engl.: electron
franz.: électron

Elektronenbahnen, die Bahnen, welche die einzelnen Elektronen in der Elektronenhülle der Atome (s. Atombau) vom Korpuskel-Standpunkt betrachtet nach der Theorie des B o h r schen *Atommodells beschreiben. [1]
engl.: electron orbits
franz.: trajectoires de l'électron

Elektronenbeugung, s. Elektroneninterferenz.
engl.: electron diffraction
franz.: déviation des électrons

Elektroneneinfang, s. K-Einfang.
engl.: electron capture
franz.: capture électronique

Elektronenhülle. Die Gesamtheit der Z Elektronen, welche zusammen mit dem Z-fach geladenen Kern das Atom der Ordnungszahl Z bilden. S. Atombau. [1]
engl.: electronic cloud
franz.: nuage électronique

Elektroneninterferenz. Die Interferenzfähigkeit von Elektronenstrahlen wurde 1927 von D a v i s s o n und G e r m e r an relativ langsamen Elektronen und kurz danach von G. P. T h o m s o n an raschen Elektronen durch Beugung an Kristallgittern, später durch Beugung an Kanten von B o e r s c h nachgewiesen, nachdem nach der Wellentheorie der Materie von d e B r o g l i e eine solche Interferenz zu erwarten war.
Danach beträgt die Wellenlänge eines materiellen Teilchens der Masse m $\lambda = h/m\,v$ (h P l a n c k sches Wirkungsquantum, v Geschwindigkeit).
Beim Durchgang von Elektronenstrahlen durch Kristalle oder durch polykristalline Materie und bei der

Reflexion an Kristallen treten alle Arten von Interferenzen auf, die von den Röntgenstrahlen her bekannt sind: Laue-Interferenzen an Einkristallen, Debye-Scherrer-Ringe an polykristallinem Material usw., ferner noch die interessanten Interferenzen in konvergenten Strahlenbündeln.
Ein wesentlicher Unterschied beider Strahlenarten zeigt sich jedoch in der Intensität der Streuung an den einzelnen Atomen des Gitters. Diese ist für Elektronenstrahlen außerordentlich viel größer als für die viel durchdringenderen Röntgen-Strahlen. Daher lassen sich E. mit durchgehenden Strahlen nur an äußerst dünnen Schichten erhalten. Hierbei tritt oft der Dünne der Schicht wegen die Raumgitterinterferenz so sehr zurück, daß das Kristallgitter nur noch wie ein zweidimensionales Gitter wirkt und die Kreuzgitter-Interferenzen entstehen. Auch Kikuchi-Linien treten bei E. viel intensiver auf als bei Röntgen-Interferenzen und sind daher bei letzteren erst viel später nachgewiesen worden.
Die *Neutronenbeugung ist ein analoges Phänomen.
Die E.n werden heute weitgehend neben den Röntgen-Strahlinterferenzen zur Kristallstruktur-Bestimmung und zur technischen Materialprüfung herangezogen. [1]

engl.: electron interference
franz.: diffraction électronique

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1956. – R. Seeliger, Angewandte Atomphysik, Springer, Berlin, 1938. – M. v. Laue, Materiewellen und ihre Interferenzen, Geest u. Portig, Leipzig, 1948. – E. Fues, Beugungsversuche mit Materiewellen, Hdb. d. Experimentalphysik, Erg.werk, Bd. 2, 1, 1935.

Elektronenkanone nennt man eine Vorrichtung, die einen gerichteten und möglichst scharf gebündelten Strahl von Elektronen liefert. Als Elektronenquelle dient fast stets eine Glühkathode. Mittels eines vorgesetzten Wehnelt-Zylinders wird eine gewisse Bündelung des Strahls erreicht, die durch elektronenoptische Hilfsmittel noch verbessert werden kann. [1]

engl.: electron gun
franz.: canon à électrons

Elektronenkaskaden, s. Strahlung, kosmische, und Schauer.

Elektronenladung. Die Ladung eines Elektrons ist e i n e (negative, beim Positron positive) Elementarladung = 1,602 · 10^{-19} Coulomb. Sie wird mit e bezeichnet. Dieselbe Ladung (+ oder −) haben auch alle anderen geladenen Elementarteilchen. [1]
engl.: electron charge *franz.: charge de l'électron*

Elektronenladung, spezifische, nennt man das Verhältnis von Ladung zu Masse des Elektrons. Die sp. E. beträgt:

$$e/m = 1{,}759 \cdot 10^8 \, \mathrm{C\,g^{-1}} . \qquad [1]$$

engl.: specific electron charge
franz.: charge d'électron spécifique

Elektronenlaufzeit. Die Zeit, die für den Elektronenübergang von der Kathode zur Anode eines Zählrohres benötigt wird. Sie ist umgekehrt proportional der Feldstärke und der Elektronenbeweglichkeit. Letztere hängt ab von Gasart und Druck. Die Elektronenlaufzeit pflegt zwischen 10^{-6} s und 10^{-7} s zu liegen. [6]
engl.: time of flight
franz.: durée de parcours des électrons

Elektronenmasse, die Ruhmasse des Elektrons und des Positrons. Sie beträgt 0,5488 TME oder 0,9108 · 10^{-27} g. Ihre Bestimmung geschieht indirekt aus der spezifischen Ladung e/m_0 des Elektrons und der Elementarladung e, die beide experimentell ermittelt werden können. [1]
engl.: electron mass *franz.: masse de l'électron*

Elektronenmikroskop ist eine Vorrichtung zur Abbildung kleiner Objekte mittels Elektronenstrahlen. Die Abbildung wird durch elektrostatische oder durch magnetische Elektronenlinsen vermittelt, die den Elektronenstrahlen Richtungsänderungen aufzwingen, die denen entsprechen, die Lichtstrahlen durch optische Linsen erfahren. Der Hauptvorteil des E. besteht in der gegenüber dem Lichtmikroskop beträchtlich gesteigerten Auflösung, die heute schon unter 1 mμ (10^{-7} cm) herabreicht. (Ein Lichtmikroskop erreicht äußerstens einige 10^{-5} cm.) Eine Abart, das Feld-E. oder Spitzen-E., erzielt eine außerordentlich starke Vergrößerung der Oberfläche einer emittierenden feinen Metallspitze

ohne Elektronenlinsen, einfach durch den divergierenden Strahlengang. Verwendet man beim Spitzenmikroskop eine Ionenstrahlung statt der Elektronenstrahlung (Ionenmikroskop), so wird die Auflösung noch höher und man kann im Bild bereits die durch die Kristallgitterstruktur bedingte regelmäßige Lagerung der Atome erkennen. [1]

engl.: electron microscope

franz.: microscope électronique

Lit.: J. Picht und R. Gain, Das Elektronenmikroskop, Fachbuchverlag Leipzig, 1955. – E. W. Müller, Atomic structure in the field ion microsope, Journ. Applied Physics, Vol. **28**, S. 1, 1957.

Elektronenpaar, besteht aus einem Elektron und einem Positron, die gemeinsam entstehen (Paarerzeugung). [7]

engl.: electron pair *franz.: paire d'électrons*

Elektronenradius. Obwohl man für ein Elektron keine genaue räumliche Ausdehnung festlegen kann, läßt sich doch eine Größenordnung hierfür angeben, da sich aus den Konstanten m_0 (Ruhmasse) und e (Ladung) des Elektrons sowie der Vakuumkonstanten c (Lichtgeschwindigkeit) eine Größe von der Dimension einer Länge, nämlich

$$\frac{e^2}{m_0\, c^2} = 2{,}84 \cdot 10^{-13}\,\mathrm{cm}$$

bilden läßt. Meist nennt man die Hälfte dieser Größe, $1{,}42 \cdot 10^{-13}$ cm, den „klassischen E.". Er hat folgende anschauliche Bedeutung: Denkt man sich die Ladung des Elektrons über eine Kugeloberfläche von diesem Radius gleichmäßig verteilt, so wird die gesamte Feldenergie des außerhalb dieser Kugel (innen ist das Feld Null) klassisch berechneten elektrischen Feldes gerade gleich der Ruhenergie des Elektrons. [1]

engl.: electron radius *franz.: rayon de l'électron*

Elektronenschalen, s. Atombau.

engl.: electron shells *franz.: couches électroniques*

Elektronenschleuder (auch Betatron oder Rheotron genannt). Die E. ist ein Gerät zur Beschleunigung von Elektronen auf sehr hohe Energie. Die Elektronen laufen dabei im Innern einer ringförmigen, auf höchstes Vakuum ausgepumpten Röhre auf kreisförmigen Bahnen um, zu denen sie durch ein Magnetfeld ent-

sprechender Stärke gezwungen werden. Durch die Achse des Ringes geht ein Eisenkern, dessen Magnetisierung zeitlich anwächst. Dadurch wirkt auf die Elektronen eine induzierte Feldstärke, welche sie auf ihrer Kreisbahn dauernd beschleunigt, solange die Zunahme des magnetischen Flusses dauert. Die Elektronen bilden dabei sozusagen die Sekundärspule eines Transformators. Jeder Umlauf entspricht einer Windung der Sekundärspule. Machen die Elektronen sehr viele Umläufe, so erreichen sie eine Energie, welche der hohen, in einer Sekundärspule von sehr vielen Windungen induzierten Spannung entspricht, ohne daß diese Spannung tatsächlich erzeugt zu werden braucht.

Während der Beschleunigung der Elektronen wird auch das Magnetfeld, in dem sie umlaufen, gesteigert, so daß sie trotz ihrer zunehmenden Energie immer auf derselben Kreisbahn (Sollkreis) bleiben. Ziemlich schwierig ist die Herausführung des Elektronenstrahls aus der Röhre. In vielen Fällen begnügt man sich daher, diesen in der Röhre nach Erreichung der Höchstenergie mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf ein Metallblech treffen zu lassen, wobei äußerst harte Röntgen-Strahlen entstehen.

Neuerdings wird vielfach das Prinzip der E. mit demjenigen des *Zyklotrons (Beschleunigung durch ein hochfrequentes elektrisches Wechselfeld) kombiniert. Derartige Geräte heißen *Synchrotron und erreichen noch wesentlich höhere Endenergien.

In Deutschland sind bis jetzt erst E.n bescheidener Größe gebaut worden (bis maximal 15 MeV Elektronenenergie bei $1^1/_2$ t Gewicht). Sehr viel weiter ist die Entwicklung in den USA fortgeschritten, wo schon 1945 von der General Electric Company ein 100 MeV-Synchrotron von 130 t Gewicht gebaut wurde und neuerdings eine Anzahl Geräte – E.n und Synchrotrons – in Betrieb sind, die z. T. Elektronen bis rund 1000 MeV Energie und entsprechend harte Röntgen-Strahlen liefern. Noch größere E. sind im Bau, u. a. auch in Hamburg. [1]

engl.: betatron *franz.: bêtatron*

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1956. – R. Kollath, Teilchenbeschleuniger, Braunschweig, 1955.

Elektronenspin. Der Spin = Eigendrehimpuls des Elektrons beträgt $^1/_2\,\hbar$. Der halbzahlige Spin bedingt, daß das Elektron dem Pauli-Prinzip (s. Ausschließungsprinzip) genügen muß und daher der Fermi-Statistik gehorcht. Näheres s. Spin. [1]
engl.: electron spin *franz.: spin de l'électron*

Elektronenstoß, der Stoß eines rasch bewegten Elektrons auf ein Atom oder Molekül. Der E. kann entweder elastisch oder unelastisch sein. Im letzteren Falle wird die innere Energie des getroffenen Teilchens geändert. Überträgt das stoßende Elektron Energie an das Atom oder Molekül, so dient diese zur Anregung oder, falls sie hoch genug ist, zur Ionisation dieses Teilchens. Liegt die Bewegungsenergie des Elektrons unter der niedrigsten Anregungsenergie des getroffenen Atoms, so kann keine Energie an das Atom abgegeben werden (außer der kleinen, dem Massenverhältnis entsprechenden Bewegungsenergie), und der Stoß verläuft elastisch. Bei höherer Bewegungsenergie des Elektrons tritt in einem bestimmten Bruchteil aller Fälle, der durch die Anregungswahrscheinlichkeit bzw. Ionisierungswahrscheinlichkeit, s. Ionisierungsfunktion, gegeben wird, Anregung oder Ionisierung ein.
Trifft ein Elektron auf ein angeregtes Atom, so kann es auch umgekehrt eintreten, daß es die Anregungsenergie von diesem übernimmt und mit höherer Energie abprallt. Dies nennt man einen Stoß zweiter Art. [1]
engl.: electronic impact
franz.: choc d'un electron
Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1956.

Elektronensynchrotron, s. Synchrotron.

Elektronenvolt (Abk.: eVolt oder eV). Das E. ist die in der Atomphysik allgemein gebräuchliche Einheit der Energie. Es bezeichnet diejenige Energie, welche ein Elektron – oder sonst ein mit einer elektrischen Elementarladung geladenes Teilchen – beim freien Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 V erwirbt. Mit anderen Energieeinheiten hängt das E. folgendermaßen zusammen:

$$1\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{erg} = 1{,}634 \cdot 10^{-20}\ \mathrm{mkp} = 3{,}828 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{kcal.}$$

1 Million eV wird mit 1 MeV abgekürzt und ist die in der Kernphysik gebräuchliche Energieeinheit. [1]
engl.: electron volt *franz.: électron-volt*

Elektronenwellen sind die *Materiewellen des Elektrons, s. a. Elektroneninterferenz. [7]
engl.: electron waves *franz.: ondes électroniques*

Elektronenzählrohr, s. Zählrohr.

Elektronenzerfall, svw. β-Zerfall.

Elektronenzwilling. Synonym für *Elektronenpaar, s. Paarerzeugung. [7]

Elektronik, Wissenschaft und deren Anwendung beim Bau elektrischer Geräte, bei der die trägheitsarme Beeinflussung von Elektronenbewegungen im Vakuum oder in Halbleitern ausgenutzt wird. [6]
engl.: electronics *franz.: electronique*

Elektrophorese, die Bewegung von kolloidalen Teilchen in einem Sol unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes. Je nach der Richtung der wandernden Teilchen wird dieser Vorgang auch Kataphorese bzw. Anaphorese genannt. Die Wanderungsgeschwindigkeit ist, unabhängig von der Teilchengröße und von gleicher Größenordnung wie die der Ionen. [3]
engl.: electrophoresis *franz.: electrophorèse*

Elementarladung (auch elektrisches Elementarquantum). Die elektrische Ladung kommt nur in ganzzahligen Vielfachen einer kleinsten Einheit vor. Diese kleinste Ladung nennt man E. Sie tritt negativ als Ladung des Elektrons und Antiprotons, positiv als Ladung des Positrons und des Protons auf, ferner noch mit beiden Vorzeichen als Ladung der Mesonen und Hyperonen. Der Wert der E. ist

$$e = 4{,}803 \cdot 10^{-10} \text{ elektrostatische CGS-Einheiten} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C}.$$

Dieser Wert ist unabhängig vom Zustand des Teilchens, auch von seiner Geschwindigkeit. Bei allen Umwandlungen bleibt die Summe der vorhandenen E.n (unter Berücksichtigung des Vorzeichens) erhalten. [1]
engl.: electronic charge
franz.: charge élementaire, charge de l'électron

Elementarprozeß der Strahlenchemie ist die Wechselwirkung eines Teilchens oder Quantes mit der

Materie und die daraus resultierenden Vorgänge. Wir unterscheiden folgende Einzelprozesse:

Elementarprozeß

1. Einfangprozesse.

$A \rightsquigarrow A^+ + e^-$	Singulett oder Triplett-
$A \rightsquigarrow A^*$	anregung durch Quanten-
$e^- + A \rightsquigarrow A^-$	strahlung

2. Reaktionen von angeregten Molekülen oder Ionen.

$A^+ \rightarrow R_1^+ + R_2$	hierbei sind verschiedene
$A^- \rightarrow R_1^- + R_2$	Produkte möglich
$A^* \rightarrow B + C$	Neue Molekülbildung
$A^* \rightarrow R_1^{*}. + R_2^{*}.$	Radikalbildung
$A^* \rightarrow B^+ + C^-$	Ionenbildung

3. Reaktionen, die zusätzlich Elektronen erzeugen.

$A^+ \rightarrow A^{Z+} + (Z-1)e^-$	Auger-Effekt
$A^* \rightarrow A^+ + e^-$	Autoionisation
$A^* + B \rightarrow A + B^+ + e^-$	Stoßionisation

4. Reaktionen, die unter Austausch von Ladung oder Anregung verlaufen.

$A^+ + A \rightarrow A + A^+$	Ladungsübergang in kondensierter Phase unter Resonanzbedingungen
$A^+ + B \rightarrow A + B^+$	Ladungsübergang ohne Resonanz
$A^+ + B \rightarrow C^+ + D$	Ladungsübergang gleich-
$A^+ + nB \rightarrow A^+ B_n$	zeitig mit einer Reaktion
$A^* + A \rightarrow A + A^*$	Resonanzübergang, Anregung wandert in der kondensierten Phase
$A^* + B \rightarrow A + B^*$	Anregungsübergang ohne Resonanzbedingungen

5. Neutralisationsreaktion.

$e^- + A^+ \rightarrow A$	Strahlungseinfang, der relativ unwahrscheinlich ist,
$A^* + B^- \rightarrow A(^*) + B(^*)$	Ein oder beide Moleküle können angeregt sein

(Tab. nach Magee.) [18]

engl.: elementary process franz.: processus élémentaire

Elementarteilchen, die nicht mehr weiter zerlegbaren letzten Bausteine der Materie (oder allgemeiner der Natur). Bis 1932 kannte man nur zwei E., das Elektron und das Proton. Inzwischen ist eine größere Anzahl von E. neu entdeckt worden.

Wir unterscheiden heute unter den materiellen E.:

1. Die „leichten" E. oder Leptonen.

Zu ihnen gehören das Elektron und das Positron.

2. Die „mittleren" E. oder Mesonen mit einer Masse zwischen der des Elektrons und der des Protons.

Von diesen ist eine größere Anzahl entdeckt worden. S. Meson.

3. Die „schweren" E. oder Nukleonen.

Zu ihnen gehört das Proton, das Neutron, das Antiproton und Antineutron.

4. Die Hyperonen oder überschweren E. mit Massen oberhalb der des Neutrons. Die Liste ist sicher noch nicht abgeschlossen.

Außerdem muß zu den E. noch das Lichtquant oder Photon gerechnet werden, sowie Neutrino und Antineutrino, die die Ruhmasse 0 haben.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der modernen Physik ist, daß alle die genannten Elementarteilchen keine unzerstörbare Individualität haben, sondern sich weitgehend ineinander verwandeln können. E., welche sich mit einer gewissen Halbwertszeit spontan umwandeln, nennt man instabile E. Zu ihnen gehören alle Mesonen und Hyperonen mit äußerst kurzer Halbwertszeit sowie die instabilen Neutronen, welche sich mit 15 Minuten Halbwertszeit in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino umwandeln. Analog das Antineutron. [1]

engl.: elementary particle

franz.: particule élémentaire

Lit.: E. Fermi, Elementary particles, Oxford Univ. Press, 1951.

Elementarzelle. Das kleinste Volumelement eines Kristalls, das durch identische Wiederholung und Aneinanderreihung den gesamten Kristall aufbaut. Die E. ist ein Parallelepiped, das durch die Längen der drei Kanten und durch die drei Winkel, welche dieselben miteinander bilden, gekennzeichnet ist. Zur vollständigen Beschreibung der E. gehört ferner die Angabe von Zahl, Art und Position der Gitterbausteine

(Atome, Ionen, Moleküle) in der E. (*Kristallstruktur). [4]
engl.: unit cell
franz.: cellule élémentaire

Elementumwandlung. Die E. war im ausgehenden Mittelalter das Ziel der Alchimisten, wurde dann später nach Aufkommen der wissenschaftlichen Chemie für unmöglich gehalten und kann heute durch die künstliche Kernumwandlung in gewissen Grenzen bewerkstelligt werden. Solche Kernumwandlungen, bei denen sich die Kernladungszahl ändert, werden als E. bezeichnet. Durch künstliche Kernumwandlungen erzeugte, in der Natur nicht vorkommende, instabile Elemente sind: Technetium (Ordnungszahl $Z = 43$), Promethium ($Z = 61$), Astatin ($Z = 85$), Francium ($Z = 87$), Neptunium ($Z = 93$), Plutonium ($Z = 94$), Americium ($Z = 95$), Curium ($Z = 96$), Berkelium ($Z = 97$), Californium ($Z = 98$), Einsteinium ($Z = 99$), Fermium ($Z = 100$), Mendelevium ($Z = 101$) und Nobelium ($Z = 102$). Von ihnen wird Plutonium im großen als Atomsprengstoff hergestellt. [1]
engl.: transmutation of elements
franz.: transmutation d'éléments

Elution. Entfernung eines von einem Ionenaustauscher aufgenommenen Stoffes durch Auswaschen mit einer geeigneten Flüssigkeit. Diese ist meist ein Komplexbildner, der Komplexe verschiedener Stabilität mit den adsorbierten Ionen bildet. [3]
engl.: elution *franz.: elution*

Eman, Einheit der Konzentration der Radium-Emanation in Luft oder in einer Lösung. 1 E. bedeutet eine Konzentration, bei der sich in 1 Liter eine Emanationsmenge von 10^{-10} Curie befindet. Es ist: 1 Eman = 0,275 Mache-Einheiten. [1]

Emanation, radioaktives Edelgas der Ordnungszahl 86. Als Element wird die E. häufig auch als Radon (chemisches Symbol Rn) bezeichnet, obwohl man hierunter vielfach auch das spezielle Isotop der Massenzahl 222, die Radium-Emanation versteht. Von der E. sind drei verschiedene Isotope bekannt, die zu den drei natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen gehören: die Aktinium-Emanation (auch Aktinon) mit der Mas-

senzahl 219, die Thorium-Emanation (auch Thoron) mit der Massenzahl 220 und die Radium-Emanation (auch Radon) mit der Massenzahl 222. Alle drei zerfallen unter Aussendung von α-Strahlen mit Halbwertszeiten von 3,92 s, 54,5 min und 3,825 Tagen. Außerdem kennt man noch einige leichtere Isotope mit Massenzahlen von 212 bis 218, die in Zerfallsreihen künstlich erzeugter radioaktiver Isotope auftreten. [1]
engl.: emanation *franz.: emanation*

Emaniermethode. Von O. Hahn eingeführte Methode zur kontinuierlichen Untersuchung von Struktur- und Oberflächenänderungen mit Zeit und Temperatur. In eine Substanz, z. B. Eisenhydroxyd, wird durch gleichzeitige Ausfällung eine radioaktive Atomart eingebracht, die eine Emanation aussendet. Der aus der Substanz entweichende Bruchteil der entstehenden Emanationsatome (Emaniervermögen) ist neben der Halbwertszeit von der Struktur und Oberflächenausbildung der Substanz abhängig und wird durch Alterung, Trocknung, Rekristallisation, Gitterumwandlung usw. beeinflußt. Durch Beobachtung der Veränderung des Emaniervermögens kann das thermische Verhalten von festen Stoffen untersucht werden. Bei der Bestimmung der Oberflächengröße werden Unebenheiten bis zu 10^{-6} cm erfaßt. Für die Versuche eignen sich am besten Thoron und Radon. [3]
engl.: emanation method
franz.: méthode de l'émanation
Lit.: K. E. Zimen, Angewandte Radioaktivität, S. 75, Springer, Berlin, 1952.

endotherm. Eine Reaktion ist e., wenn bei ihr Energie absorbiert wird. Bei einer e.n Kernreaktion ist daher die Summe der Ruhemassen der reagierenden Bestandteile (Elementarteilchen und Kerne) kleiner als die der Endprodukte. [5]
engl.: endothermic oder endoergic
franz.: endothermique

Energie, gebundene, s. Zustandsgrößen.

Energie-Eigenbedarf von Reaktoren. Der E. setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:
1. Die gesamte Pumpleistung für die Kühlkreise. Sie ist bei den Reaktortypen, die natürliche Konvektion

verwenden, sehr klein, kann aber bei anderen (z. B. bei gasgekühlten Reaktoren) Werte bis zu 10 oder sogar 20 % der Reaktorleistung erreichen. Es ist zu beachten, daß ein überwiegender Teil (85 %) der benötigten Pumpleistung wieder dem Kühlmittel zugeführt wird.
2. Energiebedarf aller Steuerorgane und sonstiger zum Reaktorbetrieb nötigen Aggregate.
Der E. ist eine für die Optimalisierung der Reaktorkonstruktion wesentliche Größe. [21]

Energiefreisetzung pro Spaltung, s. Nachtrag.

Energieniveau. Ein E. ist die Energie eines der stationären Zustände eines atomaren Systems, also eines Atoms, Moleküls oder Kerns. Jedes solche System kann nur eines dieser ganz bestimmten, „diskreten" E.s annehmen.
Das energetisch tiefste E. eines atomaren Systems ist sein *Grundzustand, in dem es sich normalerweise befindet. Die höheren E.s entsprechen den angeregten Zuständen (s. Anregung). [1]
engl.: energy level *franz.: niveau d'énergie*

Energiepreise, Strom- und Gaspreise, in den meisten Ländern öffentlich reglementiert: Preisstop, Tarifbindung für die Versorgung der Allgemeinheit, „Freigabe" der Sonderabnehmer (Industrie usw.). Setzen sich meist zusammen aus Grundpreis oder Leistungspreis und Arbeitspreis. [24]

Energiepreisrecht, umfängliche Rechtsmaterie der staatlichen Energiepreisreglementierung. [24]

Energiequant, die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Energieeigenwerten eines Systems. Das E. variiert von System zu System und ist also keine universelle Zahl. Man will mit E. nur ausdrücken, daß ein System Energie nicht in beliebigen Beiträgen aufnehmen oder abgeben kann, sondern daß dieses immer in ganz bestimmten Portionen, „Q u a n t e n", erfolgt. Zum Beispiel schwingt eine Saite der Länge l nur in ganzen Vielfachen ihrer Grundfrequenz. Die Energie, die der Saite beim Übergang von der Grundschwingung zur 1. Oberschwingung zuzuführen ist, ist das Energiequant dieses schwingenden Systems. Seine Größe hängt ab von der Länge l der Saite. [7]
engl.: energy quantum *franz.: quantum d'énergie*

Energie-Reichweite-Beziehung

Energie-Reichweite-Beziehung. Zwischen der Bewegungsenergie und der Reichweite einer raschen Korpuskel in einem bestimmten Stoff besteht eine eindeutige Beziehung, die E. Diese ist vor allem für Protonen, Deuteronen und α-Teilchen, die eine scharf definierte Reichweite besitzen, in verschiedenen Stoffen, besonders in Luft von Normaldruck, genau vermessen.

Energie (MeV)	Reichweite in Luft (cm)		
	Protonen	Deuteronen	α-Teilchen
1	2,3	1,8	0,55
2	7,1	4,7	1,1
3	14,0	8,8	1,7
4	23,1	14,2	2,5
6	46,8	28,0	4,6
8	76	46,2	7,25
10	110	67,8	10,55

Die Tabelle gibt einen Ausschnitt aus der E. für Protonen, Deuteronen und α-Teilchen in Luft von 760 mm Druck und 15 °C. [1]

engl.: energy-range relation

franz.: relation énergie-portée

Energiesatz für strömende Medien. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik lautet in differentieller Form

$$\mathrm{d}q = \mathrm{d}u + \mathrm{d}l\,,$$

wobei dq die dem System zugeführte Wärmemenge, du die Änderung der inneren Energie und dl die von dem System geleistete Arbeit ist. Für stationäre Strömungen, die sich durch die Angabe einer mittleren Geschwindigkeit in jedem Querschnitt beschreiben lassen, kann der E. unter Benützung der Enthalpie i, der Geschwindigkeit w, der Höhe h *eines* Querschnitts über einer willkürlich gewählten Nullebene und der von außen (z. B. durch eine Pumpe) dem System zugeführten Arbeit l^* in der etwas zweckmäßigeren Form

$$\mathrm{d}q + \mathrm{d}l^* = \mathrm{d}i + \frac{1}{g}\, w\, \mathrm{d}w + \mathrm{d}h$$

geschrieben werden (dabei sind alle Größen auf die Gewichtseinheit des strömenden Mediums bezogen). Die Gleichung gilt auch für Strömung mit Reibung, hierbei wird die Summe von kinetischer und potentieller Energie um den Betrag der Reibungsarbeit vermindert, während die Enthalpie um den Wärmewert dieser Verminderung zunimmt. [5]
engl.: energy balance
franz.: théorème de l'énergie, théorème de conservation

Energiespektrum von Neutronen, Häufigkeit der Neutronen in Abhängigkeit von der Energie. [7]
engl.: energy spectrum *franz.: spectre énergétique*

Energieterm, syn. zu *Energieniveau.

Energietönung von **Kernprozessen.** Genau wie man bei chemischen Reaktionen von einer Energietönung spricht, welche die (bei exothermen Prozessen) frei werdende oder die (bei endothermen Prozessen) aufzuwendende Energie je Mol der reagierenden Stoffe darstellt, so kann man dies auch bei Kernprozessen tun. Wie bei chemischen Prozessen nennt man diese Energietönung auch vielfach Wärmetönung. Sie liegt größenordnungsmäßig eine Million mal höher als die Energietönung chemischer Prozesse. Sie wird meist je einzelnen umgewandelten Kern in MeV ausgedrückt. Hier folgen die E. für einige Kernprozesse:

$$^{2}\text{H}\ (\gamma, \text{n})\ ^{1}\text{H} - 2{,}23\ \text{MeV}$$
$$^{2}\text{H}\ (\text{d}, \text{n})\ ^{3}\text{He} + 3{,}23\ \text{MeV}$$
$$^{2}\text{H}\ (\text{d}, \text{p})\ ^{3}\text{H} + 3{,}96\ \text{MeV}$$
$$^{7}\text{Li}\ (\text{p}, \alpha)\ ^{4}\text{He} + 17{,}2\ \text{MeV}$$
$$^{7}\text{Li}\ (\alpha, \text{n})\ ^{10}\text{B} - 2{,}8\ \text{MeV}$$
$$^{14}\text{N}\ (\alpha, \text{p})\ ^{17}\text{O} - 1{,}3\ \text{MeV}$$
$$^{14}\text{N}\ (\text{n}, \alpha)\ ^{11}\text{B} - 0{,}24\ \text{MeV}$$
$$^{235}\text{U}\ (\text{n, Spaltung}) \approx +200\ \text{MeV}$$

[1]

engl.: reaction energy
franz.: énergie d'une réaction nucléaire

Lit.: Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen, I. Bd., 5. Teil, 6. Aufl., Springer, Berlin, 1952.

Energieübertragung. Übertragung von Energie durch Wechselwirkung von Atomen oder Molekülen über eine größere Anzahl von Atomen hinweg, ohne daß eine chemische Umsetzung eintreten muß. [18]
engl.: energy transfer *franz.: transfert d'énergie*

Energieverlust je Stoß, s. Bremsung von Neutronen.

Energieverluste in Reaktoren setzen sich zusammen aus:

1. Der Energieabstrahlung aus dem Reaktor. Diese Energie wird zum größten Teil im biologischen und je nach Konstruktion auch im thermischen Schild absorbiert und durch ein Kühlmittel abgeführt.
2. dem *Energie-Eigenbedarf des Reaktors. [21]

engl.: energy losses in reactors
franz.: pertes (d'énergie) dans un réacteur

Energiewirtschaft. Im weiteren Sinne möglichst wirtschaftlicher Einsatz aller Energieträger und Energiearten (einschließlich Atomenergie) zur rationellen Deckung der Bedürfnisse der Volkswirtschaft. Im engeren Sinne nur *Elektrizitätswirtschaft und Gaswirtschaft. Siehe auch Energiewirtschaftsgesetz. [24]

Energiewirtschaftsgesetz. Deutsches Gesetz zur Förderung der Energiewirtschaft (Energiewirtschaftsgesetz) vom 13. Dezember 1935 (RGBl. I, S. 1451); regelt *Energieaufsicht und *Energie-(Elektrizitäts- und Gas-)Versorgung nach Interessen des Gemeinwohls. [24]

Energiewirtschaftsrecht. Teilgebiet des allgemeinen Wirtschaftsrechts; umfaßt im weiteren Sinne alle Energiearten und Energieträger (Energierecht), im engeren, gebräuchlichen Sinne nur das Recht der Elektrizitäts- und Gasversorgung; in Deutschland *Energiewirtschaftsgesetz. [24]

Energie-Zuwachsfaktor, s. Zuwachsfaktor.

Engpaßleistung eines Kraftwerks ist die durch den leistungsschwächsten Anlageteil (z. B. Turbine oder Reaktor) begrenzte maximale Dauerleistung, und zwar bei voll einsatzfähigem Werk, mit der die Anlage wirklich betrieben werden kann. Die Differenz von E. und Nenn-Leistung ist ein Maß für die Ungenauigkeiten, mit denen die Planung behaftet ist. [21]

Enrico-Fermi-Reaktor (auch PRDC – Power Reactor Development Company), ein schneller Leistungs-Brüter, der 1960 in Betrieb gesetzt werden soll. Abb. 1 zeigt einen Schnitt durch den Reaktor. Der E. F.-R. ist für eine Wärmeleistung von 300 MW ausgelegt

(90 MW elektrisch). Der effektive Fluß wird $0{,}5 \cdot 10^{16}$ bei einer mittleren Neutronenenergie von 0,25 MeV betragen. Die Lebensdauer der prompten Neutronen beträgt 0,2 µs. Die Wärme wird durch einen primären und sekundären Na-Kreislauf auf H_2O übertragen, wobei Dampf von 402 °C bei einem Druck von 42 at entsteht. Es wird ein Brutfaktor von 1,2 erwartet.

Enrico-Fermi-Reaktor

Die Abb. 2 zeigt einen Schnitt durch aktive Zone und

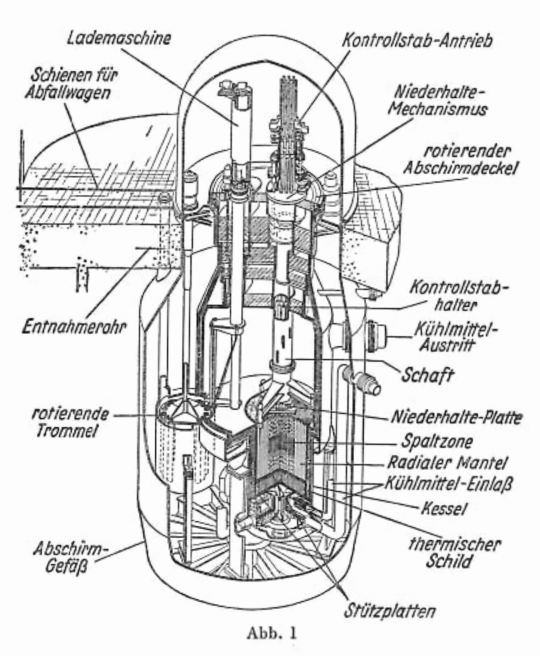


Abb. 1

Brutmantel. Die S p a l t z o n e besteht aus 91 Elementen (7,75 Vol-% U^{235}, 21,35 % U^{238}, 24,7 % Zr und Mo, dazu 46,2 % Kühl-Na). Der radiale Brutmantel enthält 572 Elemente (46,7 Vol.-% U^{238}, 19,3 % rostfreier Stahl und 34 % Kühl-Na). 198 Blöcke aus rostfreiem Stahl bilden den thermischen Schild. Die 10 Kontrollstäbe bestehen aus ^{10}B-angereichertem Borkabid in Stahlhülsen. Die Abb. 3 zeigt

Enrico-Fermi-Reaktor

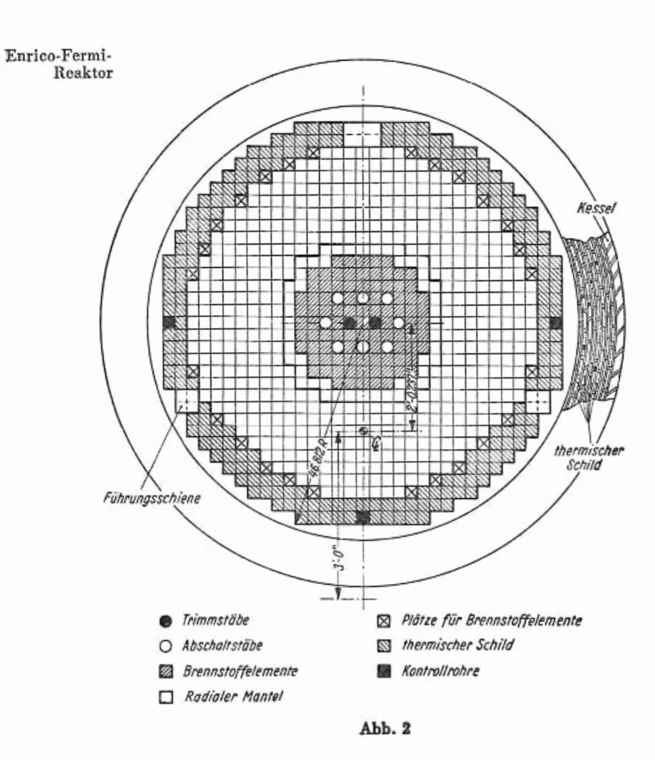


Abb. 2

Abb. 3

Enskogsche Lösung

ein Brennstoffelement. In der Mitte befindet sich der Spaltstoffteil, bestehend aus 144 Stäben aus U-Mo-Legierung mit Zr-Hülsen. An den beiden Enden befinden sich je 16 Stäbe des Stirnmantels, bestehend aus ^{238}U in nichtrostenden Stahlhülsen.
Das Na des Primärkreislaufes fließt durch das Reaktorgefäß nach oben, wobei 90 % durch die Spaltzone, 7 % durch den radialen Mantel und 2 % durch die Kontrollstäbe geleitet werden, während 1 % zur Kühlung des thermischen Schildes dienen.
Der Reaktor muß im Wochen-Durchschnitt etwa 10 bis 20 Stunden stillgelegt werden, damit die Brennstoff- bzw. Brutstoffelemente ausgewechselt werden können. Dazu wird nach Auskupplung der Kontrollstäbe und Anheben der Niederhalten-Platte der drehbare Schild-Deckel so gedreht, daß der Greifermechanismus über der aktiven Zone zu liegen kommt, wo er ein beliebiges Element erfassen, hochziehen und durch Drehung um seine Achse in die Behälter-Trommel überführen kann. Aus dieser Trommel wird das verbrauchte Element von einer eigenen Vorrichtung hochgezogen, abtransportiert und durch ein neues ersetzt. [13]
Lit.: Nucleonics, April 1957, S. 68.

Enskogsche Lösung der Boltzmann-Gleichung. Der bekannteste Versuch der Lösung der Boltzmann-Gleichung ist derjenige von Enskog. Dies ist eine Art Störungsrechnung auf Grund eines modifizierten Vorschlags von Hilbert. Dabei wird für die *Wahrscheinlichkeitsdichte f (in der Lit. oft Verteilungsfunktion genannt) der Ansatz

$$f = f^{(0)} + \varepsilon f^{(1)} + \varepsilon^2 f^{(2)} + \ldots$$

gemacht. Diese Methode der sukzessiven Näherung kann prinzipiell auf Systeme angewendet werden, bei denen die Gradienten der thermodynamischen Größen sehr stark sind. In nullter Näherung, in der die Verteilung eine lokale Maxwellsche Verteilung $f^{(0)}$ ist, folgen die Eulerschen Gleichungen der Hydrodynamik, bei Berücksichtigung von Störungen erster Ordnung – mit dem Ansatz $f^{(1)} = f^{(0)} [1 + \varphi]$ – erhält man die Gleichungen von Navier-Stokes, Störungsansätze 2. Ordnung führen zu den Burnettschen Gleichungen. Da die Parameter der Störungs-

entwicklung die lokale Temperatur, die lokale Dichte und die lokale Strömungsgeschwindigkeit (mittlere Massengeschwindigkeit) sind, liefert die Enskogsche Methode nur eine beschränkte Klasse von Lösungen. Es wird im allgemeinen angenommen, daß die Enskogsche Entwicklung konvergiert. Dies konnte jedoch bis jetzt nicht bewiesen werden. [27]

engl.: Enskog's solution *franz.: solution d'Enskog*

Lit.: D. Enskog, Dissertation Uppsala (Schweden), Almqvist und Wiksell, 1917. – S. Chapman and T. G. Cowling, Mathematical Theory of Non-uniform Gases, Cambridge Univ. Press, London, 1952. – J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss and R. B. Bird, Molecular Theory of Gases and Liquids, Wiley, New York, 1954.

Entaktivierung, identisch mit Entseuchung.

Entgiftung, Entfernung von Neutronen-absorbierenden Spaltprodukten aus Uran- und Plutoniumstäben, die sich im Reaktor befunden haben, evtl. auch Entfernung starker Neutronenabsorber aus Moderatorsubstanz und Strukturmaterial, z. B. Bor aus Graphit, oder Hafnium aus Zirkon. S. Reaktorgifte. [7]

engl.: decontamination *franz.: décontamination*

Entgiftungsfaktor ist das Verhältnis aller Verunreinigungen im Brennstoff (Reaktorgifte) vor und nach der Brennstoffaufbereitung (in Atomzahlen). Man spricht auch vom E. der einzelnen Aufbereitungszyklen und einzelner Reaktorgifte. [22]

engl.: decontamination factor

franz.: facteur de décontamination

Entlademaschine, s. Lademaschine (Nachtrag).

engl.: fuel discharging machine

franz.: dispositif de déchargement de combustible

Entsalzer, Apparat, um Wasser von den darin enthaltenen Mineralien zu befreien. Wasser, das als Kühlmittel oder Moderator im Reaktor verwendet wird, muß salzfrei sein, weil die zugehörigen Atomkerne durch Neutronenbeschuß u. U. radioaktiv werden können. [7]

engl.: demineraliser *franz.: démineralisateur*

Entseuchung, radioaktive (Dekontamination), Entfernung von radioaktiven Substanzen von Geräten, Kleidern, der Haut, aus dem Wasser und der Luft. Die Reinigung der Geräte, die mit sehr geringen Aktivitäten kontaminiert sind, kann im normalen Ausguß er-

folgen, dessen Wasser gesondert aufbereitet wird. Radioaktiv verseuchte Kleidung muß gesondert gewaschen und gebügelt werden. Für die Entfernung radioaktiver Verbindungen von der Haut müssen besondere Brauseräume vorhanden sein. Alle radioaktiven Abwässer müssen mit speziellen Methoden gereinigt und vor dem Auslaß in das normale Abwassersystem geprüft werden. Ebenso ist eine Luftreinigung mit Filtern notwendig, um flüchtige radioaktive Substanzen zurückzuhalten.

Die von der Strahlenschutzkommission vorgeschlagenen maximal zulässigen Konzentrationen für einige Radioisotope sind in der Tabelle aufgeführt. [18]

Maximal zulässige Konzentration von Radioelementen bei Dauerzufuhr

Element	Halbwertszeit	Maximal zulässige Konzentration in $\mu c/cm^3$	
		in Wasser	in Luft
^{24}Na	15 d	$8 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}
^{32}P	14 d	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-7}
^{35}S	87 d	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}
^{60}Co	5,7 d	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-8}$
^{86}Rb	18,6 d	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-7}$
^{90}Sr–^{90}Y	28 a	$8 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-10}$
^{131}J	8 d	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$
^{137}Cs–^{137}Ba	30 a	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$
natU	10^8–10^9 a	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-11}$

engl.: decontamination
franz.: décontamination, desactivation

Entseuchungsgrad, das Verhältnis der Zahl der radioaktiven Atome vor und nach der Entseuchung (Entaktivierung, Dekontamination) von radioaktiven Abwässern, Abfällen, Ausrüstungsgegenständen und Räumen. [22]
engl.: decontamination factor
franz.: facteur de décontamination

Entseuchungsmittel. Als E. haben sich folgende am besten bewährt: Salpetersäure (10 %), Natriumhydroxyd (10 %) + Tartratsäure (2,5 %), Natriumfluorid (3 %) + Salpetersäure (20 %). Als weitere

E. werden ferner Zitronensäure (10 %), Oxalsäure (10 %) und eine Zusammensetzung von Natronlauge (10 %) + Tartratsäure (2,5 %) + Natriumperoxyd (0,09 molar) genannt.
Die „reinigende“ Wirkung der oben genannten organischen Säuren beruht auf ihrer Fähigkeit, mit anorganischen Ionen (der radioaktiven Elemente oder Radikale) nicht-dissoziierende Komplexverbindungen zu bilden, die entfernt werden. [22]
engl.: decontamination substances
franz.: substances de décontamination

Epicadmium-Neutronen sind solche mit Energien oberhalb der *Cadmium-Grenze, die bei etwa 0,49 eV angenommen werden kann. [7]
engl.: epicadmium neutrons
franz.: neutrons épicadmium

Epilation, svw. Haarausfall. Die E. ist ein charakteristisches Symptom einer Strahlenschädigung, das etwa zwei bis drei Wochen nach der Strahleneinwirkung erkennbar wird. Die Regeneration der Haarfollikel und das Nachwachsen der Haare setzt meist zwei bis drei Monate nach der Strahleneinwirkung wieder ein. [28]
engl.: epilation *franz.: épilation*

Epilationsdosis, s. Dosis.
engl.: epilation dose *franz.: dose d'épilation*

epithermischer Energiebereich liegt oberhalb des thermischen. Legt man normale Temperaturen zugrunde, so reicht der e. Bereich bis zu einigen 10 eV. Eine exakte Grenze existiert nicht. – e. Neutronen sind solche im oben angegebenen Energiebereich. [7]
engl.: epithermal
franz.: épithermique

Erholung. Ein Vorgang, bei dem die von vorausgegangener Kaltverformung herrührenden *Eigenspannungen eines Metalles abgebaut werden, ohne daß sich Festigkeit, Verformbarkeit und Gefüge wesentlich ändern. Die E. kann eine Vorstufe der *Rekristallisation sein. [4]
engl.: recovery
franz.: revenu

Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkunde, Springer, Berlin, 1950.

Erichsen-Tiefung, s. Tiefungsprüfung.

Ermüdung. Zustand eines Werkstoffes, der durch lokale plastische Verformung und *Verfestigung bei dynamischer Wechselbeanspruchung entsteht und dazu führt, daß der Werkstoff bei wiederholter Belastung schon unterhalb der im statischen Versuch ermittelten Festigkeit (Zugversuch, Biegeversuch) zu Bruch geht. Das Bruchgefüge eines solchen Dauerbruchs unterscheidet sich deutlich von dem eines Gewaltbruches. Kennwerte für die Festigkeit bei dynamischer Wechselbeanspruchung werden in *Dauerversuchen gewonnen. [4]

engl.: fatigue

franz.: fatigue

Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkunde, Springer, Berlin, 1950. – IUTAM, Kolloquium über Ermüdungsfestigkeit, Springer, Berlin, 1956.

Ermüdungskorrosion. Die gleichzeitige Wirkung einer dynamischen Wechselbeanspruchung und eines chemischen Angriffs auf ein Werkstück. Die E. setzt die Festigkeitseigenschaften erheblich herab (*Ermüdung, *Korrosion). [4]

engl.: fatigue corrosion

franz.: corrosion de fatigue

Erststoß-Korrektur. Nach der Alterstheorie ergibt sich als Bremsdichte für eine Punktquelle im unendlichen homogenen Medium

$$q(\mathfrak{r}, \tau) = \frac{1}{(4\pi\tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{|\mathfrak{r}|^2}{4\pi\tau}\right],$$

wobei τ das Fermialter der Neutronen bedeutet. Für leichte Moderatorkerne mit einer Massenzahl $A > 1$ ist diese Formel sicher unzutreffend, da die Bremsung nicht kontinuierlich erfolgt. Es verhält sich nämlich die *Kollisionsdichte unstetig. Diese Erscheinung ist auf die „Erststöße“ zurückzuführen. Bei diesen kann das Neutron, welches mit einer Spaltenergie von E_0 entstehen möge, höchstens bis zu einer Energie von αE_0 abgebremst werden. Dabei ist $\alpha = (A-1)^2/(A+1)^2$. Man kann nun eine Korrektur der oben gegebenen Formel versuchen, indem man an Stelle der Punktquelle eine „verschmierte“ Neutronenverteilung einsetzt, und zwar deren Verteilung nach dem ersten Stoß.

Die Bremsdichte für die Punktquelle nimmt dann die Form

$$q(\mathfrak{r}, \tau) = \int_0^\infty \frac{\Sigma_0 \, \mathrm{e}^{-\Sigma_0 |\mathfrak{r}'|}}{4\pi |\mathfrak{r}'|^2} \cdot \frac{1}{(4\pi\tau)^{3/2}} \cdot \exp\left[-\frac{|\mathfrak{r}' - \mathfrak{r}|^2}{4\tau}\right] \mathrm{d}\mathfrak{r}',$$

wobei der Index 0 auf E_0 hinweist.

Außer der E.-K. kann man noch eine „Letztstoß-Korrektur" anbringen, welche in Rechnung stellt, daß das Neutron nach jedem Stoß eine gewisse Strecke (die mittlere freie Weglänge) durchmißt, bevor es auf den nächsten Kern trifft. In der Alterstheorie wird dieser Umstand nicht berücksichtigt. Tut man es jedoch, so beträgt die Bremsdichte der Punktquelle nunmehr

$$q(\mathfrak{r}, \tau) = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\Sigma_0 \, \mathrm{e}^{-\Sigma_0 |\mathfrak{r}'|}}{4\pi |\mathfrak{r}'|^2} \, \frac{\mathrm{e}^{-\frac{|\mathfrak{r}'' - \mathfrak{r}'|^2}{4\pi\tau}}}{(4\pi\tau)^{3/2}} \cdot \frac{\mathrm{e}^{-\Sigma(E) |\mathfrak{r}'' - \mathfrak{r}|}}{4\pi |\mathfrak{r}'' - \mathfrak{r}'|^2} \, \mathrm{d}\mathfrak{r}' \, \mathrm{d}\mathfrak{r}''.$$

Ausgehend von der korrigierten Bremsdichte kann man deren zweites Moment und damit auch ein korrigiertes Neutronenalter bestimmen. Wenn man bei dieser Gelegenheit ein Spaltspektrum $f(E)$ berücksichtigt, ergibt sich

$$\tau(E) = \int_E^{E_0} f(E'') \, \mathrm{d}E'' \int_{E''}^{E_0} \frac{D'}{\xi \Sigma_s'} \frac{\mathrm{d}E'}{E'} + \int_E^{E_0} \frac{f(E')}{3} \cdot \left\{ \frac{1}{[\Sigma(E_0)]^2} + \frac{1}{[\Sigma(E')]^2} \right\} \mathrm{d}E'.$$

[13]

engl.: first collision correction

franz.: correction de premier choc

Lit.: A. M. Weinberg and L. C. Noderer, Theory of Neutron Chain Reactions, AECD-3471, 1951.

Erythem. Das E. ist eine diffuse oder fleckige Hautrötung, die bei intensiver Belichtung mit ultraviolettem Licht oder ionisierenden Strahlen an den von den

Strahlen getroffenen Hautbezirken auftritt. Die zur Erzeugung eines typischen Strahlenerythems benötigte Dosis ist von der Größe des bestrahlten Feldes abhängig. Nach Röntgen-Bestrahlung tritt das E. erst nach zehn bis vierzehn Tagen in Erscheinung. Es besteht bei ihm eine Abhängigkeit zugleich von der Dosisverteilung und von der Härte der Strahlung. Die zur Erzeugung eines Strahlenerythems erforderliche Dosis ist aus der Tabelle zu entnehmen.

Spannung kV	Dosis r
7–10	2500
20–200	800
600	1100–1300
2000	2000–2500

Die Strahlenempfindlichkeit der Haut weist beim Menschen Unterschiede von ±30 % auf. Vermehrte Durchblutung (z. B. bei Entzündung) erhöht die Strahlenempfindlichkeit der Haut. [28]
engl.: erythema *franz.: erythème (cutané)*

Erythemdosis, s. Dosis.

Essigsäure (CH_3COOH) wird gemeinsam mit Ammoniumazetatlösung als Auswaschlösung von Kationenaustauscherharzen, die Uran angereichert haben, benutzt. Dieses findet beim Thorium-Uran-Extraktionsprozeß (*Thorex-Prozeß) zur Anreicherung von U-233 Anwendung. [22]
engl.: acetic acid
franz.: acide acétique

ETR. Abk. für Engineering Test Reactor, den großen *Materialprüfreaktor fortgeschrittener Konstruktion in den USA. Sehr hoher Neutronenfluß ($4 \cdot 10^{14}$ n/$cm^2 \cdot$ sec). Auf 90 % U-235-Gehalt angereichertes Uran als Brennstoff, Wasser als Moderator und Kühlmittel, 175 000 kW Wärmeleistung. In Betrieb seit 19. September 1957 in der *National Reactor Testing Station der AEC in Arco, Idaho, gebaut durch Phillips Petroleum Co., Henry J. Kaiser Co., General Electric Co. Kosten 15 Mill. $. [24]

Euratom. Kurzbezeichnung für die Europäische Atomgemeinschaft (EAG) der sechs Mitgliedsländer der Montanunion (Bundesrepublik Deutschland, Belgien, Frankreich, Holland, Italien, Luxemburg). Erstmals vorgeschlagen auf der Außenministerkonferenz dieser Staaten am 1./2. Juni 1955 in Messina, Vertrag unterzeichnet am 25. März 1957 in Rom. In Kraft seit 1. Januar 1958.

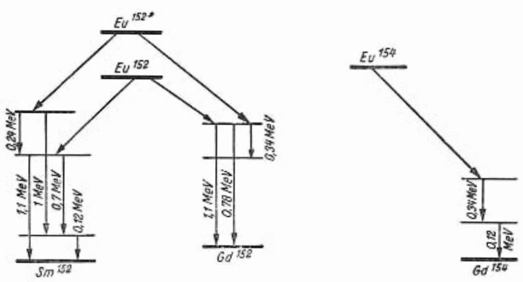
Besteht aus dem Ministerrat mit je einem Vertreter jedes Mitgliedsstaates und der fünfköpfigen Euratom-Kommission, der ein Ausschuß für Wissenschaft und Technik, die Versorgungs-Agentur, die Zentralstelle für das Meßwesen auf dem Atomgebiet sowie (später) die gemeinsame Kernforschungsstelle, Schulen für die Ausbildung von Fachkräften und eventuell eine europäische Anstalt im Universitätsrang unterstellt bzw. zugeordnet sind. Mit der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft und der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl hat Euratom die aus 142 Abgeordneten bestehende Europäische Versammlung, den Gerichtshof und den Wirtschafts- und Sozialausschuß mit 101 Mitgliedern, gemeinsam. Euratom besitzt auf Grund des Vertrages weitgehende Befugnisse zur Koordinierung und Förderung der Atomenergieentwicklung der Mitgliedsländer sowie zur Durchführung eigener Vorhaben der Gemeinschaft, die sich insbesondere auf die Versorgung mit Kernbrennstoffen, die Sicherheitskontrolle und die Außenbeziehungen mit dritten Staaten erstrecken. [24]

Eurochemic, s. Nachtrag.

European Atomic Energy Society, *Europäische Atomenergiegesellschaft.

Europium 152, 154 und 155. Durch Bestrahlung der in der Natur vorkommenden Elemente mit langsamen Neutronen erhält man bei Eu die höchste spezifische Aktivität. Bei einem Fluß langsamer Neutronen von 10^{14} n cm^{-2} s^{-1} erhält man das Isotop ^{152}Eu mit einer spezifischen Aktivität von 36 000 Curie/g und das Isotop ^{154}Eu mit einer spezifischen Aktivität von 1300 Curie/g. ^{155}Eu wird über Neutronenaktivierung von Samarium gewonnen.

Sämtliche drei Eu-Isotope sind Beta- und Gammastrahler.
Eu ist das dankbarste Element für *Neutronenaktivierungsanalysen. Allerdings ist die Bedeutung des Eu als seltenstes Element unter den seltenen Erden nicht sehr groß. Eu-Spuren werden in Leuchtmassen, zu deren Analyse man auf die aktiven Isotope des Eu zurückgriff, angewendet. [16]



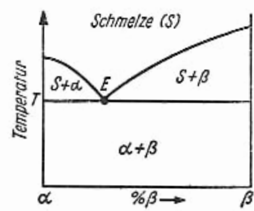
Zerfallsschemata für Europium 152 und 154

Eu^{152} (angeregter Zustand)
Halbwertszeit: 13 Jahre
Eu^{152} (Grundzustand)
Halbwertszeit: 9,3 Stunden

Eu^{154}
Halbwertszeit:
16 Jahre

engl.: europium *franz.: europium*

Eutektisch, eine bei konstanter Temperatur (T) stattfindende Reaktion, bei welcher eine homogene Schmelze in zwei oder mehrere feste Phasen übergeht (z. B. Schmelze $S \rightleftarrows \alpha + \beta$). Die Zahl der festen Phasen ist dabei gleich der Zahl der Komponenten des Systems. – Eine entsprechende Reaktion, bei welcher anstelle der Schmelze eine weitere feste Phase teilnimmt, nennt man e u t e k t o i d. – Ein e.s System (Eutektikum) hat im e.n Punkt (E) die niedrigste Schmelztemperatur. Die Legierung mit der Zusammen-



setzung des e.n Punktes wird als e.e Legierung bezeichnet. Sie hat im festen Zustand ein besonders feines Gefüge ($\alpha + \beta$), das häufig einen Orientierungszusammenhang zwischen den einzelnen Gefügebestandteilen erkennen läßt (z. B. lamellares Eisen-Kohlenstoff-Eutektoid [Perlit], Aluminium-Zink-E. usw.). [4]
engl.: eutectic *franz.: eutectique*
Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkunde, Springer, Berlin, 1590. – E. Brandenberger, Allg. Metallk., Reinhardt, München 1952.

Euxenit. Niobate und Tantalate der *Seltenen Erden mit einem Gehalt an Uran und Thorium. [3]
engl.: euxenite *franz.: euxénite*

eV, s. Elektronenvolt.

EVA. Bezeichnung für das zweite geplante Atomkraftwerk der staatlichen schwedischen Elektrizitätsbehörde. Elektrische Leistung über 100 000 kW, natürliches Uran als Brennstoff, Schweres Wasser als Moderator und Kühlmittel, Kosten 180 Mill. skr., Fertigstellung 1963. [24]

exotherm. Eine Reaktion ist e., wenn bei ihr Energie frei wird. Bei einer exothermen Kernreaktion ist daher die Summe der Ruhemassen der reagierenden Teilchen und Kerne größer als die der Endprodukte. Alle radioaktiven Zerfallserscheinungen sind e. [5]
engl.: exothermic, exoergic *franz.: exothermique*

Experiment, kritisches, s. kritisches Experiment.
engl.: critical experiment
franz.: expérience critique

Experimentiereinrichtungen. Normalerweise können nur in Reaktoren, welche speziell für Forschungs- und Entwicklungszwecke gebaut werden, E. eingebaut werden. Die E. in Reaktoren kann man etwa wie folgt einteilen:

a) Einrichtungen für die Messung physikalischer Stoffwerte (Oszillator, thermische Säule etc.).
b) Einrichtungen zur Bestrahlung von Materialproben und zur Isotopenherstellung.
c) Einrichtungen zur betriebsmäßigen Prüfung von Reaktorbaustoffen, Kühlmitteln und Konstruktionen. [8]

engl.: experimental facilities
franz.: installations d'expérimentation

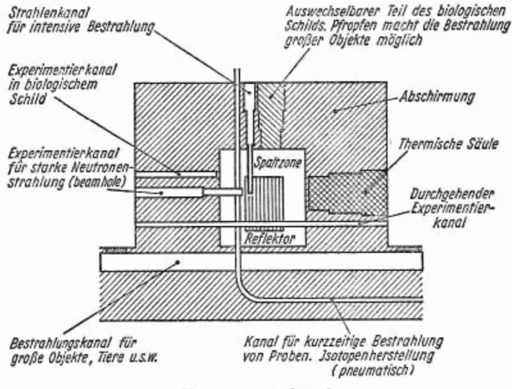
Experimentierkanäle im Reaktor ermöglichen die für die Kettenreaktion nicht benötigten Strahlungen (Neutronen, γ, β) der Spaltzone für Experimente auszunützen. Bei vielen physikalischen Experimenten wird dies außerhalb des Reaktors geschehen. Bei den technischen Versuchen, die z. B. die Erprobung eines neuen Brennstoffelementes oder eines Kühlmittels betreffen, oder bei Isotopenproduktion befindet sich das Versuchsobjekt in einem Experimentierkanal und ist meistens dem höchstmöglichen Neutronenfluß ausgesetzt. Im allgemeinen benötigen technische Experimente wesentlich größere Kanäle (10 bis 20 cm Durchmesser) als die physikalischen (~5 cm Durchmesser).

Experimentierkanäle

Konstruktionsmäßig lassen sich folgende Typen unterscheiden:

1. durch die Spaltzone hindurchgehende Kanäle,
2. sog. Fingerhüte, sie enden in der Spaltzone oder im Reflektor,
3. Kanäle im biologischen Schild.

Ihre Lage im Reaktor ist im wesentlichen durch die Höhe und die Energie des Neutronenflusses bestimmt, die benötigt wird. S. Abb. bei den verschiedenen Forschungsreaktoren.



Experimentierkanäle

Entsprechend ihrer Verwendung sind folgende Unterscheidungen zu machen:

a) Physikalischen und reaktortechnischen Experimenten dienen u. a. Kanäle für den Reaktor-Oszillator (am günstigsten bei Nullenergiereaktoren), für den mechanischen Neutronenzerhacker (Chopper), für die thermische Säule.

b) Technischen Versuchen dienen Kanäle, die den Einbau eines oft großen Versuchseinsatzes erlauben, z. B. Brennstoffelemente mit dazugehörigen Kühlkreisläufen (Loop), Kanäle für Materialprüfung.
Einrichtungen im biologischen und thermischen Schild für Abschirmversuche.

c) Kanäle für Isotopenuntersuchung und -Herstellung, u. a. pneumatischer Kanal für Experimente mit kurzlebigen Isotopen.

d) Kanäle, die für medizinische Untersuchungen vorgesehen sind. [21]
engl.: beam holes, channels for experiments
franz.: canale d'expérimentation

Exponentialexperiment, Exponentialreaktor, Verfahren zur Messung der materiell bestimmten *Flußwölbung einer Reaktoranordnung durch eine unterkritische Menge.
Setzt man an eine Seite (Boden) einer unterkritischen kubischen oder zylindrischen Anordnung von spaltbarem Material und Moderator eine Neutronenflächenquelle, so fällt der Neutronenfluß in einer Richtung (nach oben) exponentiell ab. Daher rührt der Name dieser Messung. Die materiell bestimmte Flußwölbung gewinnt man durch Ausmessung des Neutronenflusses. Aus dem E. kann man die benötigte kritische Stoffmenge und den kritischen Radius der jeweiligen Anordnung bestimmen. E.e sind daher ein wesentliches Element zur Kontrolle und Eichung der Rechnungen zur Reaktorentwicklung. Insbesondere werden die *Gruppenkonstanten, die oft schwer aus den Elementen berechnet werden können, mit Hilfe von E.n bestimmt, so daß Differenzen zwischen Theorie und Experiment beseitigt werden. [7]
engl.: exponential experiment
franz.: expérience exponentielle

Expositionsfaktor ist eine Hilfsgröße für *radiographische Aufnahmen mit Gammastrahlern, die sich

errechnet nach der Formel:

$$\frac{\text{Aktivität des Strahlers} \times \text{Expositionszeit}}{\text{Abstandsquadrat des Films zur Strahlungsquelle}}.$$

Der E. hängt ab von Strahlhärte, Absorberart und -dicke, dem photographischen Material und der gewünschten photographischen Schwärzung. [16]

engl.: exposure factor

franz.: facteur d'exposition

Lit.: Handbook on radiography, Ottawa, 1950.

Expositionsrechenschieber, dient zur Ermittlung der Expositionsdaten radiographischer Aufnahmen unter Berücksichtigung von Filmschwärzung, Materialdicke, Strahlhärte, Abfall usw. [16]

engl.: exposure calculator

franz.: calculateur de pose

Extraktion ist die Trennung eines Stoffes von einem anderen mit Hilfe eines Lösungsmittels, welches den einen Stoff gar nicht oder kaum, den anderen dagegen vollständig oder zumindest wesentlich besser als den ersteren löst. Handelt es sich um die Trennung zweier fester Stoffe durch E., spricht man von fest-flüssig-E. Handelt es sich um die Trennung zweier Flüssigkeiten (z. B. auch Lösungen) voneinander mit Hilfe einer dritten, spricht man von einer flüssig-flüssig-E. oder *Solventextraktion. Um eine solche handelt es sich auch, wenn ein in einer Flüssigkeit gelöster Stoff aus dieser herausgezogen werden soll, insbesondere dann, wenn in der Lösung noch andere Stoffe gelöst sind, die nicht mit in das extrahierende Lösungsmittel übergehen sollen, also eine „selektive" Herauslösung nur des einen Stoffes erfolgen soll. Die E. fest-flüssig wird auch als „Auslaugung" bezeichnet. Sie spielt in der *Aufbereitung der Uranerze und in der *Brennstoffaufbereitung eine bedeutende Rolle. Die E. erfolgt in vier Stufen:

1. Auslaugen des Extraktionsgutes mit dem Extraktions-(Lösungs-)Mittel.
2. Trennen der Lösung von Rückstand (*Filtration, *Zentrifugieren).
3. Trennen des extrahierten Stoffes vom Lösungsmittel (*Abdestillieren, *Verdampfen).

4. Austreiben der Lösungsmittelreste aus dem Rückstand (z. B. Vakuumdestillation).

Daher Bestandteile einer Extraktionskolonne: Extrakteur, Destillator, Kondensator, Lösungsmittelbehälter, Filter, Zentrifuge. Lösungsmittel sind häufig leicht flüchtige organische Flüssigkeiten (s. Kernbrennstoffaufbereitung), in der Uranerzaufbereitung kommt man meist mit Wasser, Säuren oder Salzlösungen aus. Vorzugsweise benutzt man *saure* Laugung mit Salpetersäure (ergibt Uranylsulfat) oder *alkalische* Laugung mit Soda-Bicarbonatlösung.

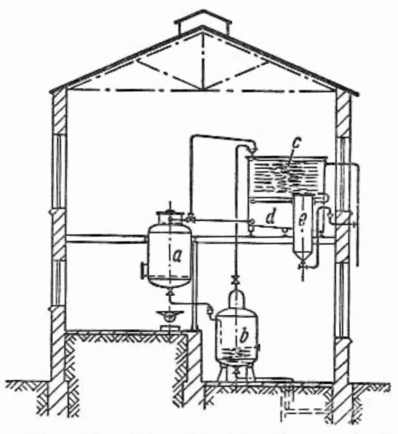


Abb. 1. Extraktion. *a* Extraktor, *b* Destillator, *c* Kondensator, *d* Lösungsmittelbehälter, *e* Wasserabscheider.

Die E. kann absatzweise oder stetig erfolgen. Im ersteren Falle hat man meist stehende Extrakteure als *Reaktionsapparate, aber auch rotierende Gefäße oder Pressen nach Art von Filterpressen. Stetig arbeitende Extraktionsapparate (*Hildebrandt*, *Bollmann*) verwenden meist Schnecken oder Becherwerke, die das zu extrahierende Gut im Gegenstrom zum Lösungsmittel bewegen. Anordnung meist in Form eines U-Rohres. Die *Lösung ist letzten Endes eine Diffusion und gehorcht daher ähnlichen Gesetzen: Die gelöste Menge B hängt von der Stoffübergangszahl σ, der Konzentration c_s an der Grenzfläche und der mitt-

leren Konzentration c_f in der Lösung zur Zeit t und der Berührungsfläche f ab: $B = F \cdot \sigma(c_s - c_f) \cdot t(\text{kg})$. Der Extraktionsvorgang, wie allgemein jeder Lösungs- und Auslaugungsvorgang kann durch Rühren wesentlich beschleunigt werden. Vgl. auch Urangewinnung. [2]
engl.: extraction
franz.: extraction

Extraktionskolonnen (extraction columns) dienen dem Zweck, nicht mischbare Flüssigkeiten in möglichst innigen Kontakt miteinander zu bringen, damit ein Austausch von Stoffen zwischen den einzelnen Phasen ermöglicht wird.
Nichtmechanische E. sind solche, in denen die Durchwirbelung (Dispergierung) und inniger Kontakt der verschiedenen Flüssigkeiten ohne Anwendung mechanischer Rührer kontinuierlich durchgeführt werden kann. Die E.-Kolonnen bestehen in den meisten Fällen aus hohen zylindrischen Säulen, in denen die in engen Kontakt zu bringenden Flüssigkeiten nach Möglichkeit im Gegenstrom aneinander vorbeifließen und sich berühren. Damit die Durchmischung und der Kontakt sehr innig wird, sind diese Kolonnen häufig mit sog. oberflächenaktiven Kontaktfüllstoffen lose aufgefüllt. Denselben Zweck erfüllen auch perforierte Zwischenböden oder feinporige Raschingringe. Als Füllstoffe der „gepackten" Kolonnen *(engl.: packed columns)* hat sich u. a. gesintertes Aluminiumoxyd bewährt. Die perforierten Platten werden aus Edelstahl, Raschigringe aus gesintertem Aluminiumoxyd oder aus Sinteredelstahl hergestellt. Die in der Kolonne zum Kontakt kommenden Flüssigkeiten müssen bei der Benutzung von Raschigringen extrem filtriert sein, damit eine Verstopfung der Böden vermieden wird.
Pulsierende E. sind E., in denen den im Gegenstrom durchströmenden flüssigen Phasen periodische Vor- und Rückwärtsbewegungen mittels entsprechender Pulsierungs-Generatoren aufgezwungen werden. Durch die pulsierende Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der im Gegenstrom langsam hindurchfließenden unmischbaren Phasen, werden diese aufgewirbelt und dispergiert. Sie werden gleichfalls gezwungen, die Raschigringe oder perforierte Platten wiederholt zu durchflie-

ßen. Dadurch wird ein besonders inniger Kontakt und – bei einer vorgegebenen Kolonnenhöhe – eine wesentlich längere Kontaktzeit erreicht. Die Konstruktion der Extraktionskolonnen selber wird den jeweiligen Anforderungen angepaßt. Zur besseren Kontrolle der Arbeitsweise der Kolonnen ist das Anbringen von Schaugläsern oder die Ausführung der Kolonnen aus durchsichtigem Material von Vorteil. S. a. Solventextraktion. [22]

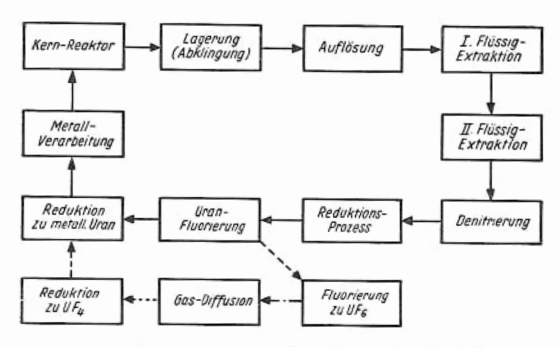
engl.: extraction columns franz.: colonne d'extraction

Lit.: R. G. Geier, Application of the Pulse Column to the Purex Process, HW 49 542. – Benedict u. Pigford, Nuclear Chemical Engineering, McGraw-Hill, New York, 1957. – Bruce, Fletcher, Hyman, Katz, Progress in Nuclear Energy, Series III, Process Chemistry, Bd. 1, Pergamon Press, London, 1956.

Extraktionsprozesse bei der Brennstoffaufbereitung.

A) F e s t - f l ü s s i g , s. Zonenschmelzverfahren.

B) F l ü s s i g - F l ü s s i g *(engl.: solvent extraction)*.



Fließschema im flüssig-flüssig-Extraktionsprozeß

Bei diesem Brennstoffaufbereitungsprozeß werden die Kernbrennstoffe in Säuren oder Basen aufgelöst und anschließend mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion von den hochradioaktiven Spaltprodukten entgiftet. Innerhalb dieser Prozesse wird ebenfalls das durch Neutroneneinfang und anschließende Kernumwandlung aus Uran-238 entstandene Plutonium-239 vom Uran getrennt. Neu gebildetes, spaltbares Uran-233 wird vom Brutstoff Thorium-232 in ähnlichen Verfahren separiert.

1. Für die Trennung und Entgiftung von n a t ü r -

lichem Uran und gebildetem Plutonium bei Al-eingehüllten Spaltstoffelementen werden u. a. folgende Extraktionsprozesse angewandt:

Extraktionsprozesse

*Redox-Prozeß (= Reduktions-Oxydationsprozeß). Auflösungsmittel: Salpetersäure, organisches Extraktionsmittel: Hexon, Salzagens: Aluminiumnitrat.

*Purex-Prozeß (= Plutonium-Uran-Extraktion). Auflösungsmittel: Salpetersäure, organisches Extraktionsmittel: 30 % TBP in Kerosin, Salzagens und Auflösungsmittel: Salpetersäure.

*Chelation-TTA-Prozeß. Auflösungsmittel: Salpetersäure, organisches Extraktionsmittel: TTA in Hexon, Salzagens: Aluminiumnitrat.

2. Für die Trennung und Entgiftung von angereichertem Uran (bei Al-eingehüllten oder legierten Spaltstoffelementen) werden u. a. Extraktionsprozesse in der flüssigen Phase durchgeführt.

*Prozeß-25-TBP. Auflösungsmittel der Spaltstoffelemente: Salpetersäure, organisches Extraktionsmittel: 5 % TBP in Kerosin.

Salzagens: salpetersaure Aluminiumnitratlösung.

*Prozeß-25-Hexon. Auflösungsmittel der Spaltstoffelemente: Salpetersäure, organisches Extraktionsmittel: Hexon.

Salzagens: Aluminiumnitrat.

3. Für die Trennung und Entgiftung von Uran-233 von Thorium und Protaktinium werden folgende flüssigen Extraktionsprozesse angewandt:

*Interim-23-Hexonprozeß. Auflösungsmittel: Salpetersäure, Katalysator der Thoriumauflösung: F^--Ionen, organisches Extraktionsmittel: Hexon, Salzagens: Aluminiumnitrat.

*Interim-23-TBP-Prozeß. Auflösungsmittel: Salpetersäure, Katalysator der Thorium-Auflösung: F^--Ionen, Katalysator der Aluminiumauflösung: Hg^{++}-Ionen, org. Extraktionsmittel: 1,5 % TBP in Kerosin, Salzagens: salpetersaure Aluminiumnitratlösung.

*Thorex-Prozeß. Auflösungsmittel: Salpetersäure, Katalysator der Thorium-Auflösung: F^--Ionen, Katalysator der Aluminium-Auflösung: Hg^{++}-Ionen, organisches Extraktionsmittel: 42,5 % TBP in Kerosin. Salzagens: Aluminiumnitrat.

C) M e t a l l - M e t a l l. Es handelt sich um Extraktionsprozesse in flüssiger, metallischer Phase. Dabei lassen sich Spaltprodukte durch flüssige, mit Uran unmischbare Metalle (z. B. Magnesium oder Silber) aus dem Uran extrahieren. Gemeinsam mit den Spaltprodukten wird das Plutonium durch flüssiges Mg oder Ag vom Uran getrennt. Damit der Entgiftungsfaktor möglichst groß ist, muß das Extraktionsmetall im Überschuß vorhanden sein. In diesem Fall lassen sich sämtliche Spaltprodukte, sogar Tellur und ein Teil des berüchtigten, nicht extrahierbaren Rutheniums, vom Uran trennen. Das Plutonium und die Spaltprodukte werden durch Hochtemperatur-Destillation vom Extraktionsmetall separiert. [22]

engl.: extraction processes

franz.: procédés d'extraction

Lit.: Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. 7, 8, 9, Genf, 1955. – Symposium on the Reprocessing of Irradiated Fuels, Brüssel, Mai 1957, TID 7534. – Bruce, Fletcher, Hyman, Katz, Progress in Nuclear Energy, Series III, Process Chemistry, Bd. 1, Pergamon Press, London 1956.

Extraktor, Sammelbezeichnung für Extraktionsapparate. [22]

engl.: extractor

franz.: appareil d'extraction

Extrapolationskammer, Ionisationskammer, deren Volumen definiert verändert werden kann. Sie dient zur Bestimmung der Dosis für sehr kleine Volumina. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, durch Extrapolation die „Dosis für das Volumen Null“ zu bestimmen. [26]

engl.: extrapolation ionization chamber

franz.: chambre d'ionisation d'extrapolation

Extrapolationsstrecke, s. Grenze, extrapolierte.

engl.: extrapolated distance

franz.: parcours d'extrapolation, longuer d'extrapolation

F

F 1 W. Bezeichnung für die zwei von der Westinghouse Electric Corp. (USA) für die US-Marine zu bauenden *Druckwasserreaktoren zum Antrieb des ersten Atomkreuzers USS „Long Beach“ (aus: Frigate, 1. Westinghouse). Kosten 18 Mill. $. [24]

Fahrmanipulator, s. Manipulator.

Faktorenaustausch, s. Mutation.
engl.: crossing-over *franz.: crossing-over*

Faltungssatz, s. Laplace-Transformation und Fourier-Transformation.
engl.: convolution theorem
franz.: théorème de composition

Fankuchen-Anschnitt ist das Anschneiden eines Monochromatorkristalls für Neutronenstrahlen schräg zur Netzebenenschar. Dadurch wird die Strahlbreite des reflektierten Strahls kleiner als die des primär einfallenden Strahles. [26]
engl.: Fankuchen cut
franz.: coupe de Fankuchen

Fanning-Gleichung, s. Druckverlust und Kühlmittel-Druckverlust.

Fannosche Kurven. Bei Strömungen von Dämpfen und Gasen in Rohrleitungen geben die zur Berechnung von *Druckverlusten entwickelten Formeln mit konstanten Widerstandsziffern nur eine mäßige Annäherung und man wird daher in vielen Fällen graphische oder numerische Methoden zur Berechnung der Strömungsverluste anwenden müssen. Für wärmeundurchlässige Rohrwände wurde von Stodola ein Verfahren angegeben. Dabei hat man die aus dem Energiesatz und der Kontinuitätsgleichung folgende Zustandsbeziehung

$$\frac{1}{2\,g}\,w_0^2\left[\left(\frac{\varrho_0}{\varrho}\right)^2-1\right]=i_0-i\,,$$

wobei w die Geschwindigkeit, ϱ die Dichte und i die Enthalpie ist, mit Hilfe einer Dampftafel oder Zustandsgleichung in ein Temperatur-Entropie-Diagramm zu übertragen. Dabei erhält man die sog. F. K. Die durch Reibung entwickelte Wärme bleibt in dem Gas enthalten. Auf die Gewichtseinheit bezogen, ist sie für ein durchlaufendes Streckenelement dl gleich

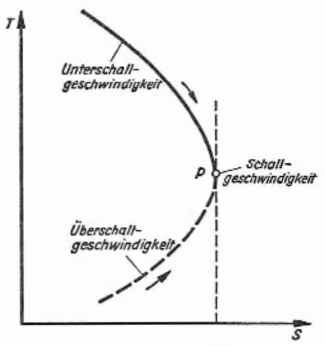
$$\mathrm{d}q_r=\frac{1}{\varrho\,g}\,\mathrm{d}p=\lambda\,\frac{w^2}{2\,g\,r_h}\,\mathrm{d}l\,,$$

wobei ϱ die Dichte, p der Druck, λ die örtliche Widerstandsziffer, w die Geschwindigkeit und r_h der hydrau-

lische Radius ist. Die Entropieänderung ergibt sich dann zu $ds = dq_r/T$ (ebenfalls auf die Gewichtseinheit bezogen), worin T die absolute Temperatur ist. Mit Hilfe der F. K. und der Beziehung $[2\,g\,(w^2 - w_0^2)]^{-1} = c_p\,(T_0 - T)$ ist es dann möglich, zu jedem ds die dazugehörige Längenänderung

$$dl = \frac{2\,g\,T\,r_h}{\lambda\,w^2}\,ds$$

zu berechnen. Bei der schrittweisen Integration der Gleichung kann λ und c_p laufend geändert werden. Man erhält auf diese Weise an jeder Stelle des Rohres die Zustandswerte s und T und damit aus der Dampftafel alle übrigen Zustandsgrößen. Die Integration kann nur in Richtung zunehmender Entropie ausgeführt werden, da eine negative Entropieänderung ohne Wärmeabfuhr unmöglich ist. Dabei erreicht man auf dem ausgezogenen oberen Ast der Kurve (s. Abb.) bei



Fanno-Kurve eines Gases, das mit Reibung durch ein Rohr strömt

einer bestimmten Rohrlänge in dem Punkt P eine Geschwindigkeit, die gerade der Schallgeschwindigkeit in dem dortigen Zustand entspricht. Auf dem gestrichelten Ast der Kurve nähert man sich von Überschallgeschwindigkeit herkommend dem Punkt P. [5]

engl.: Fanno lines

franz.: courbes de Fanno

Lit.: A. Stodola, Dampf- und Gasturbinen, 6. Aufl., Springer, Berlin, 1926.

Farbdosimeter, Dosimeter, das die aufgenommene Dosis als Verfärbung eines Stoffes (z. B. Glas oder Plastmasse) anzeigt. Bisher nur für große Dosen ($>10^6$ R) brauchbar. [6]
engl.: color dosimeter
franz.: dosimètre colorimétrique

Faßkammer. Die F. dient zur Messung einer Röntgen-Strahlen-Dosis in absoluten r-Einheiten. Man blendet einen Röntgen-Strahl von einigen Zentimetern Durchmesser aus und läßt ihn entlang der Achse von der F. laufen. Gemessen wird die Ionisation pro Volumeneinheit in der Achse der F. S. a. Dosismeßgerät. [28]
engl.: primary standard x-ray ionization chamber
franz.: grande chambre d'ionisation

Feather-Methode zur Bestimmung der Reichweite von Betastrahlen in Aluminium. 1938 von Feather angegebenes Verfahren, das mit dem Vergleich der Absorptionskurven des unbekannten Strahlers mit der Kurve eines bekannten Strahlers, meist Bi-210, arbeitet. [6]
engl.: Feather analysis
franz.: méthode de Feather

FEE. Abk. für Fast Exponential Experiment. Kleiner, schneller Versuchsreaktor, seit 1954 in Betrieb im *Argonne National Lab. der USAEC (USA). [24]

Fehlerfunktion, Fehlerintegral, s. Gaußsche F.

Feinrasterblende, s. Blende.
engl.: Potter-Bucky diaphragm
franz.: grille antidiffusante du type Potter-Bucky

Feinregelung, als Übersetzung von *fine control* mit dem deutschen Begriff *Regelung identisch. [9]

Feinreinigung wird in der Reaktortechnologie stets als nukleare Feinreinigung verstanden, d. h. als Überführung unreiner Verbindungen in *nuklearreine. Man benutzt dazu fast stets ein Verfahren der *Solventextraktion. [20]
engl.: nuclear purification
franz.: purification nucléaire

Fenster, flüssiges. Um starke γ-Strahler bei guter Sicht handhaben zu können, sind durchsichtige Fenster vorteilhaft. F. F. sind billig und verfärben sich

wenig unter der Wirkung der Strahlung. Der Behälter muß so gebaut sein, daß ein Ausfließen der gesamten Flüssigkeit unter allen Umständen vermieden wird, z. B. aus mehreren Glaskästen. Als Flüssigkeit wird meistens konzentrierte Zinkbromid-Lösung verwendet, die eine Dichte von 2,5 g/cm³ hat. [17]

Fensterzählrohr, Geiger-Müller-Zählrohr, das ein dünnes Fenster aus Aluminium, Kunststoff oder Glimmer besitzt, durch welches noch energiearme, weiche Strahlung ohne größere Absorptionsverluste in das Zählrohrinnere gelangen kann. S. a. Glockenzählrohr. [16]
engl.: window counting tube
franz.: tube compteur à fenêtre

Fermi-Alter. Das F.-A. τ ist definiert durch

$$\tau = \int_0^t D \cdot v \, \mathrm{d}t = \int_E^{E_0} \frac{D}{\sum_i \xi_i \sigma_i N_i} \cdot \frac{\mathrm{d}E}{E} \qquad (1)$$

(s. Alterstheorie). Es hat nicht die Dimensionen einer Zeit, sondern, wie man aus der Doppelgleichung leicht abliest, die Dimensionen cm². τ ist eine eindeutige Funktion der Energie, auf die das Neutron abgebremst wurde. Das gleiche gilt für den Zusammenhang mit der *Bremszeit t.

Die physikalische Bedeutung von τ erkennt man sofort, wenn man das mittlere Quadrat des Ortes bildet, an dem das von einer Punktquelle ausgehende Neutron das Alter τ hat, also untersucht

$$\overline{r^2}(\tau) = \frac{\int_0^\infty r^2 \cdot q(r,\tau) \cdot 4\pi r^2 \, \mathrm{d}r}{\int_0^\infty q(r,\tau) \cdot 4\pi r^2 \, \mathrm{d}r} . \qquad (2)$$

Mit der bei *Alterstheorie angegebenen Lösung (6) der Altersgleichung für die Verteilung der Bremsdichte um eine Punktquelle findet man

$$\overline{r^2}(\tau) = 6\,\tau . \qquad (3)$$

$\sqrt{\tau}$ ist daher ein Maß für diejenige Strecke, auf der im Mittel die Abbremsung auf die Energie E erfolgt

ist. Versteht man unter E die thermische Energie ($E = E_{th}$), so bezeichnet man das entsprechende $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{th}}$ als *Bremslänge. $\sqrt{\tau_{th}}$ bestimmt im Vergleich mit den Reaktordimensionen die Größe des Neutronenverlustes während des Bremsvorgangs (s. Neutronenausfluß). [7]

engl.: Fermi-age *franz.: âge de Fermi*

Lit.: R. L. Murray, Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., USA, 1957. – S. Glasstone and E. C. Edlund, Nuclear Reactor Theory, McGraw-Hill, New York, 1955. – F. Cap, Physik und Technik der Atomreaktoren, Springer, Wien, 1957. – W. Riezler u. W. Walcher, Kerntechnik, B. G. Teubner, Stuttgart, 1958.

Fermi-Diagramm heißt die in bestimmter Weise aufgetragene Energieverteilung der Elektronen im kontinuierlichen β-Spektrum eines radioaktiven Stoffes. Ist p der Impuls, W die Energie der Elektronen, $N\,\mathrm{d}W$ ihre relative Anzahl im Energiebreich $\mathrm{d}W$ und F ein Korrekturfaktor, so wird $(N/p\,W\,F)^{1/2}$ in Abhängigkeit von W aufgetragen. Dies sollte nach der Fermitheorie bei gewissen Vereinfachungen eine fallende Gerade ergeben. [1]

engl.: Fermi plot *franz.: diagramme de Fermi*

Fermi-Gas ist ein Gas, für das die Fermi-Statistik gilt. Die Teilchen des F. haben halbzahligen Spin. Die wichtigsten Vertreter sind das Elektronengas und das Neutronengas. [7]

engl.: Fermi gas *franz.: gaz de Fermi*

Fermi-Statistik, s. Statistik.

Fermi-Theorie, 1. der Neutronenbremsung, s. Alterstheorie,

2. des Beta-Zerfalls, wurde 1934 aufgestellt. Danach verwandelt sich in β-aktiven Kernen ein Neutron in ein Proton unter Emission eines Elektrons und eines Antineutrinos bzw. ein Proton in ein Neutron unter Emission eines Positrons und eines Neutrinos. Theorie und Erfahrung stimmen gut überein. Insbesondere erklärt die Theorie zwanglos das kontinuierliche β-Spektrum. [1]

engl.: Fermi theory (of β-decay)
franz.: théorie de Fermi

Fermische Verteilungsfunktion, s. Verteilungsgesetz.

Fermion. Als F.n werden zusammenfassend alle

Teilchen bezeichnet, welche halbzahligen *Spin besitzen und daher der F e r m i - Statistik gehorchen. Von den Elementarteilchen gehören dazu Elektronen, Positronen, Protonen, Neutronen, Neutrinos, μ-Mesonen. Gegensatz *Bosonen, das sind Teilchen mit ganzzahligem Spin. [7]
engl.: fermion *franz.: fermion*

Fermium, das achte Transuran mit der Ordnungszahl 100; chemisches Symbol Fm. Es ist wie das Einsteinium zuerst im Jahre 1953 aus Uran gewonnen worden, das der außerordentlich intensiven Neutronenstrahlung einer Wasserstoffbombenexplosion ausgesetzt worden war, und zwar fast gleichzeitig an drei amerikanischen Atomlaboratorien. Dieses erste erzeugte Isotop hat die Massenzahl 255 und ist ein α-Strahler von 16 h Halbwertszeit. Später sind noch vier andere α-strahlende Isotope Fm 250 und Fm 252 bis 254 erzeugt worden, das erstere von schwedischen Forschern auf einem ganz anderen Weg, nämlich d i r e k t aus Uran 238 durch Beschießen mit energiereichen Sauerstoffkernen aus dem Zyklotron. Schließlich erhielt man aus dem Zerfall des im Jahre 1955 gewonnenen Mendeleviums noch das Isotop Fm 256, das ausschließlich durch spontane Spaltung mit einer Halbwertszeit von 3, 2 h zerfällt. [1]
engl.: fermium
franz.: fermium

Fernaufnahme. Um ein Objekt möglichst wenig vergrößert auf dem R ö n t g e n - Bild darzustellen, muß der Abstand Fokus–Objekt so groß als möglich sein und gleichzeitig der Abstand Objekt–Film so klein wie möglich gehalten werden. Deshalb für die Aufnahmetechnik als Kompromißforderung, daß der Fokus-Film-Abstand mindestens fünfmal so groß sein soll wie der Durchmesser des abzubildenden Körperteils in der Strahlenrichtung. Die Vergrößerungen betragen dann etwa 10 bis 20 %. Bei einer Herzaufnahme mit einem Fokus-Film-Abstand von mindestens 2 m beträgt die Vergrößerung nicht mehr als 5 %: Herzfernaufnahme. [28]
engl.: teleroentgenography, teleradiography
franz.: télé-radiographie

Ferrisulfat $[Fe_2(SO_4)_3]$, s. Speiselösung.

Ferrit. 1. Bezeichnung für *Alpha-Eisen. 2. Ferrimagnetisches Mischoxyd mit Spinellstruktur, z. B. $ZnO \cdot Fe_2O_3$. [4]
engl.: ferrite
franz.: 1. ferrite, 2. magnétite

Festigkeit, s. Zugversuch, Biegeversuch, Dauerversuch, Standversuch.
engl.: strength
franz.: résistance

Feynmansche Methode, ein Verfahren zur Lösung der *Integralgleichung der Neutronendiffusion. Um diese Gleichung für eine bestimmte Energie E zu lösen, wird sie auf ein m o n o e n e r g e t i s c h e s Problem „abgebildet", nach dessen Eigenwerten entweder der Integralkern oder die Kollisionsdichte entwickelt werden. Der Grad der erzielbaren Näherung hängt von der Zahl der berücksichtigten Entwicklungsglieder ab. Eine Ausdehnung auf *inelastische und *anisotrope Streuung ist möglich. [13]
engl: Feynman's method
franz.: méthode de Feynman
Lit.: B. Davison, Neutron Transport Theory, Clarendon Press, Oxford, 1957.

Fiberglasfilter ist ein Aerosolfilter, s. Filter, absolute.
engl.: fiberglass filter
franz.: filtre en fibre de verre

Ficksches Gesetz. Das F. G. stellt den Zusammenhang zwischen dem Neutronenfluß Φ und der Dichte des Neutronenstroms j her. In seiner einfachsten Fassung lautet es

$$j(\mathfrak{r}) = -D \operatorname{grd} \Phi(\mathfrak{r}).$$

Dabei bedeutet D den Diffusionskoeffizienten. In der *Transporttheorie wird das F. G. allgemeiner gefaßt. Für den eindimensionalen Fall hat es die Gestalt

$$J(x) = \Phi_1(x) = -\frac{1}{\Sigma - \Sigma_s(1 - \overline{\mu_0})} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x} \cdot [\overline{\mu^2} \Phi_0(x)] .$$

Dabei bedeutet Φ_0 das nullte und Φ_1 das erste Moment des Neutronenflusses $\Phi(x, \mu)$, μ ist der cos des Win-

kels zwischen x-Achse und Flugrichtung des Neutrons, $\overline{\mu_0}$ der Mittelwert des cos des Streuwinkels, Σ der totale Wirkungsquerschnitt und Σ_s der Streuquerschnitt. Der Faktor vor der Ableitung wird auch als mittlere freie *Diffusionsweglänge λ_d bezeichnet. Falls die Absorption klein ist, geht diese in die *Transportweglänge über.

Aus der allgemeinen Fassung des F. G. kann man leicht ein Kriterium für die Anwendbarkeit der elementaren Diffusionstheorie gewinnen. Es muß dazu $D = \lambda_d \overline{\mu^2}$ sein, d. h. $\overline{\mu^2}$ darf nicht von x abhängen. Es läßt sich zeigen, daß daraus die Bedingung

$$\Phi_2(x) / \Phi_0(x) \ldots \text{unabhängig von } x$$

folgt (Φ_2 ist das zweite Moment des Neutronenflusses, wenn dieser nach Kugelfunktionen entwickelt wird).

Das hier besprochene Gesetz wird mitunter auch als „erstes F. G.", die elementare Diffusionsgleichung als „zweites F. G." bezeichnet. [13]

engl.: Fick's law

franz.: loi de Fick

Film-Dosimeter, photographischer Film in einem Metall- oder Kunststoffbehälter, dessen Schwärzung nach erfolgter Strahleneinwirkung das Maß für die vom Träger des Filmes empfangene Strahlenmenge liefert. S. Filmplakette. [28]

engl.: film-badge

franz.: film du personnel

Filmplakette (svw. Strahlenschutzplakette), Plakette, die einen Film zur Erfassung der Strahlenbelastung des Trägers enthält und in strahlengefährdeten Betrieben im Rahmen der Individualdosimetrie verwendet wird. Es handelt sich dabei um eine Kassette mit mehreren – nach Vorder- und Rückseite symmetrisch angeordneten – Filtern für β- und γ-Strahlenmessung; zum Nachweis von Neutronen wird eine Verstärkerfolie eingelegt oder dem Film Bor zugesetzt. Je nach Dicke des Filters, durch das die Strahlung auf den Film einfällt, entstehen auf diesem nebeneinander – der Filteranordnung entsprechend – verschiedene Schwärzungen, deren Grad photometrisch bestimmt wird. Aus den einzelnen Verhält-

nissen der somit quantitativ ermittelten Schwärzungen je zweier Schwärzungsfelder wird auf die Strahlenqualität geschlossen, die während der Belichtung wirksam war. Hieraus kann der Faktor bestimmt werden, mit dem die – an Hand von gleichzeitig mitentwickelten Eichfilmen – aus den einzelnen Schwärzungen zu entnehmenden Dosiswerte infolge der selektiven Empfindlichkeit der Filmemulsion multipliziert werden müssen, um die wahre Dosis zu erhalten, der die Filmplakette und somit gleichzeitig die hierdurch überwachte Person (am Orte der Plakette) ausgesetzt war. Die F. wird laufend getragen und regelmäßig gegen neue, unbelichtete Plaketten ausgetauscht. Sie gestattet die Erkennung der tatsächlich gegebenen Strahlenbelastung. [28]
engl.: film-badge
franz.: film du personnel, plaquette à film

Filmring, F i l m d o s i m e t e r , bei dem der Film in einem Fingerring angebracht wurde, um die Dosis zu messen, der die Hände ausgesetzt wurden. [6]

Filter, absolute (Aerosolfilter), sind Filter zur Absolutreinigung von radioaktiven Abgasen (= Kühlgase, die im Neutronenfeld aktiviert wurden, und Abgase aus Kernbrennstoffaufbereitungsanlagen: radioaktives Xenon, Krypton, Jod sowie Aerosole sämtlicher Spaltprodukte, insbesondere Aerosole der radiobiologisch hochgefährlichen Transurane). Als Aerosolfiltermedien eignen sich solche aus Glaswolle (Fiberglas), Asbest sowie aus Kunststoffharzen. Die Anwendung konventioneller Gaswäscher, elektrostatischer Abluftfilter sowie von Zyklonenseparatoren hat sich zu diesem Zweck wenig bewährt. Eine Filtereffektivität (Filterabscheidegrad) von 99,99 % (siehe Aethylenblau-Test), ein möglichst geringer Filterwiderstand (Druckverlust), Wartungsfreiheit, lange Lebensdauer und große Filterkapazität sind bei absoluten Filtern erforderlich. Die Konstruktion der Filtergehäuse und die Größe der einzelnen Filterpackungen müssen so ausgeführt sein, daß eine leichte Auswechselbarheit der Filtermedien ohne Gefährdung des Bedienungspersonals gewährleistet ist. Die Aerosolteilchengröße wird mit 0,1 . . . 1 micron angegeben. Die Effektivität der Filter wächst mit der

Feinheit des Filtermaterials. Die Filtergüte wird nach der optimalen Filtereffektivität und Kapazität bei möglichst geringem Filterwiderstand und Gesamtfiltervolumen bestimmt.

Zur Eichung der F. werden definierte Aerosole aus Aethylenblau hergestellt. Die Effektivität der F. pflegt bei Beladung zunächst sich stark zu verbessern, wobei der Filterwiderstand nur unmerklich ansteigt. Fiberglasfilter büßen bei Benetzung durch kondensierte Dämpfe an Effektivität ein. [22]

engl.: aerosol filter

franz.: filtres à aérosols

Lit.: W. C. Schmidt, Treatment of Gaseous Effluents, HW 49 549.

Filtration. Neben dem Zentrifugieren (auch Schleudern genannt) ist die F. eines der wichtigsten Verfahren zum Trennen von Feststoffteilchen aus einer Flüssigkeit (Suspension). Als Trennmittel dient eine poröse Trennwand (Filtermittel), welche für die Flüssigkeit durchlässig ist, während die Feststoffe zurückgehalten werden, die dann ihrerseits durch Aufbau des „Filterkuchens" sich an dem Filtriervorgang beteiligen. Adsorptionsvorgänge, elektrokinetische Erscheinungen, Entstehung von elektrischen Doppelschichten und andere Effekte können die F. fördern oder stören. Dazu kommt die *Korngrößenverteilung des Feststoffes, die Form der Körner und v. a. m., wodurch der Filtervorgang beeinflußt wird. Der Versuch, Gesetzmäßigkeiten für die Berechnung von Filtern aufzustellen, stößt daher auf große Schwierigkeiten. Am besten noch läßt sich das Verhalten von losen Kornhaufwerken darstellen, wobei man vom Poiseuilleschen Gesetz ausgeht, wonach die durchströmende Menge

$$V = \frac{\pi r^4 t}{8 \eta} \cdot \frac{p}{l}$$

ist, wobei p die Druckdifferenz, l die Kapillarlänge des Filters, η die Viskosität der Flüssigkeit, r der mittlere Kapillarenradius und t die Zeit sind. Im allgemeinen sind jedoch Modellversuche zur Ermittlung der Filterdaten erforderlich, die in der Aufstellung einer Filtercharakteristik gipfeln, bei der über der Filtrierzeit die Kuchendicke, die Filtratmenge und die

Filtriergeschwindigkeit aufgetragen werden. Zur Verbesserung der Leistung werden häufig Filterhilfsmittel (Kieselgur) zugesetzt. Die technische Durchführung erfolgt absatzweise (Rahmenfilterpressen, Kerzenfilter)

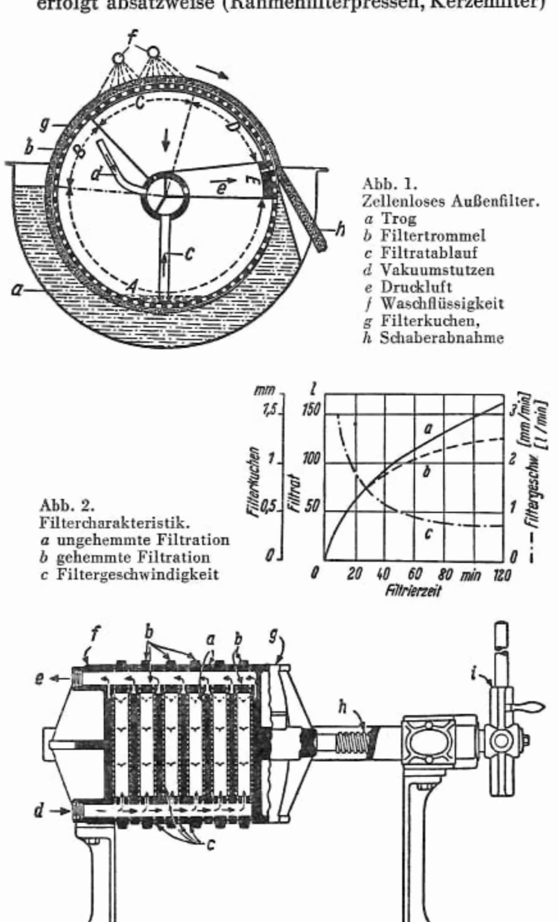


Abb. 1.
Zellenloses Außenfilter.
a Trog
b Filtertrommel
c Filtratablauf
d Vakuumstutzen
e Druckluft
f Waschflüssigkeit
g Filterkuchen,
h Schaberabnahme

Abb. 2.
Filtercharakteristik.
a ungehemmte Filtration
b gehemmte Filtration
c Filtergeschwindigkeit

Abb. 3. Rahmenfilterpresse.
a Filterplatte, *b* Rahmen, *c* Filtertuch, *d* Zulauf, *e* Filtrat.

oder stetig (Bandzellenfilter, Trommelzellenfilter, Scheibenfilter), häufig unter Anwendung von Vakuum und selbsttätiger Entnahme des Filterkuchens. Die Wahl der Filtermittel hängt von der zu filtrierenden Suspension (chemischer Angriff!) ab. [2]
engl.: filtration
franz.: filtration

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik.

FIR. Abk. für Food Irradiation Reactor, Materialprüfreaktor der USAEC und Armee in Stockton, Cal. (USA). Geplant für Bestrahlung von monatlich 1000 t Nahrungsmitteln zwecks Konservierung. Auf 90 % U-235 angereichertes Uran, Wasser als Moderator und Kühlmittel. Fertigstellung 1959, Kosten 3 Mill. $. [24]

Fissium, amerikanische Bezeichnung für eine synthetische Legierung von Uran mit allen denjenigen leichten Elementen, die bei der Kernspaltung in den Reaktoren als Spaltprodukte frei werden. Diese Legierung benutzt man zur Erprobung von Aufbereitungsprozessen an nicht radioaktivem Material. [22]

Flachblende, s. Blende.
engl.: diaphragm *franz.: grille antidiffusante*

Fläche, kritische, s. Organdosis.

Flächenaktivität, oder spezifische F., Radioaktivität, bezogen auf die Einheit der Oberfläche eines radioaktiven Präparates. Vielfach sind, insbesondere bei *Alphastrahlquellen und *Betastrahlquellen für *Radiographie, große Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der F. über das ganze Präparat gestellt. Auch von radioaktiven, vor allem dünnen Meßpräparaten, wie z. B. chemischen Niederschlägen, setzt man gleichmäßige F. über das gesamte Präparat voraus. [16]
engl.: areal activity
franz.: activité par unité de surface

Flächengewicht, Meßgröße, die häufig zur Beschreibung der Strahlenabsorption von Schichten und Wänden in Verbindung mit dem *Massenabsorptionskoeffi-

zienten angewandt wird. Man versteht darunter das Gewicht einer ebenen Schicht von 1 cm² Fläche. Das F. steht mit Dicke und Dichte der Schicht in einem einfachen Zusammenhang:

$$\text{F.} = \text{Dichte} \times \text{Dicke}\,. \qquad [16]$$

engl.: areal density
franz.: densité par unite de surface

Flächenmonitor, bewegliches Strahlungsmeßgerät, mit dem die Aktivität einer größeren Fläche gemessen werden kann. Mit einer *Ionisationskammer mit sehr dünnem großflächigem Fenster (bis etwa 100 cm²) kann z. B. bestimmt werden, ob eine Fläche mit β-strahlenden Substanzen kontaminiert ist. [17]

engl.: area monitor
franz.: jauge d'exploration (ultra-sensible)

Flächenzentriert kubisch, s. kubisch flächenzentriert.

Fließbild, ein zweckmäßiges Mittel, um den Aufbau eines Herstellprozesses aus seinen *Grundverfahren zu entwickeln (s c h e m a t i s c h e s F.) und daraus schließlich für die eingehende Planung der Anlage und ihre Kalkulation das k o n s t r u k t i v e F. abzuleiten. Es stützt sich auf die Verfahrensbeschreibung des auszuführenden Prozesses, z. B. in Form einer oder mehrerer chemischer Reaktionsgleichungen, und gibt nun die auszuführenden Schritte an. Auf diese Weise läßt sich jeder Verfahrensablauf, und sei er noch so kompliziert, übersichtlich darstellen. Die Methode und die zu verwendenden Symbole sind in DIN 7091 angegeben. Die Zeichen sind so ausgebaut, daß sie zwischen Fachleuten auch international verständlich sind. Wenngleich auch der Aufbau in drei horizontalen Feldern (oberes Feld: zuzuführende Stoffe und Energien; mittleres Feld: Verfahrensschritte und dazu erforderliche Apparate; unteres Feld: abzuführende Stoffe und abzuführende Energie) wegen seiner besonders guten Übersichtlichkeit zu empfehlen ist, so spricht nichts gegen die Anwendung anderer Anordnungen, z. B. von oben nach unten oder in mehreren hintereinandergeschalteten Zeilen. Die Anwendung des

Fließbild

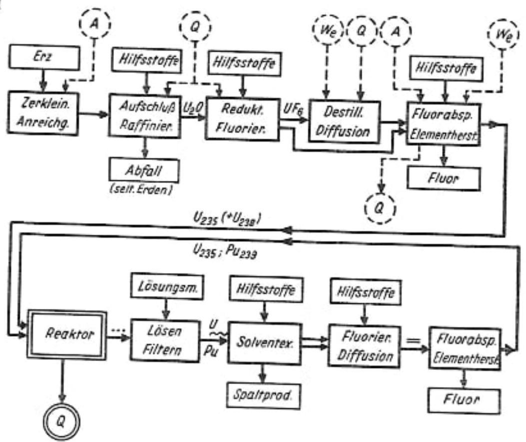


Abb. 1. Schematisches Fließbild der Kernenergiegewinnung.

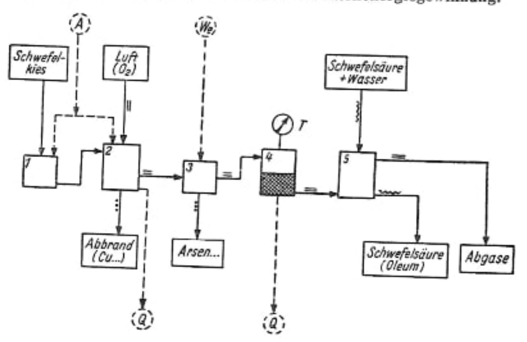


Abb. 2. Schematisches Fließbild der Schwefelsäuregewinnung.

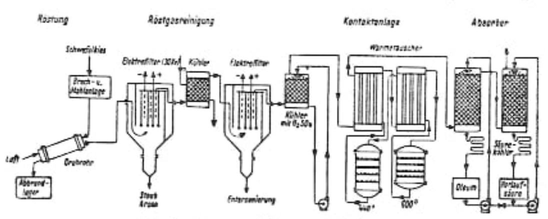


Abb. 3. Konstruktives Fließbild zu Abb. 2.

F. ist in jedem Falle vor der Planung einer Anlage ratsam, weil dadurch eine leichte Verständigung zwischen den Beteiligten möglich ist und Dispositionsfehler, wenn auch vielleicht nicht immer ausgeschlossen, so doch aber eingeschränkt werden. So läßt sich die Energieerzeugung aus Kernspaltprozessen beliebig einfach oder ausführlich von der Erzgewinnung bis zur Abfallbeseitigung in Fließbildern darstellen. [2]

engl.: flow sheet

franz.: schéma développé

Lit.: S. Kießkalt, Verfahrenstechnik, München, 1951. – F. Tegeder, Verfahren der Chemie-Industrie, Braunschweig, 1955. – W. Mialki, Kernverfahrenstechnik, Springer, Berlin, 1958.

Fließen. Plastische Verformung eines festen Werkstoffes. [4]

engl.: yield

franz.: fluage

Fließpressen. Ein *Kalt-(in Sonderfällen auch *Warm-)verformungsverfahren, das früher auch als Kaltspritzen bezeichnet wurde. Der Werkstoff wird in Form eines flachen Rohlings (Platine) in eine Matrize eingelegt und unter einem hohen, im allgemeinen rasch wirkenden Druck eines Stempels zum Fließen gebracht; der Werkstoff steigt nach Ausfüllung der Bodenfläche zwischen dem Stempel und einer Rahmenplatte entgegen der Druckrichtung an dem Stempel hoch. [4]

engl.: pressure deep drawing

franz.: filage bzw. *estampage*

Flip-flop-Schaltung, Bezeichnung einer monostabilen Multivibratorschaltung, die nach Störung ihres Gleichgewichtes durch ein Eingangssignal einen Rechteckimpuls bestimmter Form abgibt. [6]

engl.: flip-flop (circuit)

franz.: montage flip-flop

Flotieren, auch „Schwimmaufbereitung“ genannt, ist wie das *Adsorbieren ein typisches Grenzflächenverfahren, welches der nassen Trennung von Mineralien bzw. von Erzen und „Bergen“ (Gangart) dient. Das F. entwickelte sich wesentlich durch den Zwang, mehr und mehr auf arme Erze bei der Metallgewinnung überzugehen (s. Urangewinnung). Da bei

diesen die nutzbaren Erze meist in sehr kleinen Partikeln in der Gangart eingeschlossen sind, muß die *Zerkleinerung sehr weit getrieben werden (Größenordnung 5 μ). Damit werden die üblichen Verfahren der Handscheidung (nach Glanz und Farbe), Magnetscheidung und naßmechanische Aufbereitung (Absetzen) unbrauchbar, weil bei so weitgehender Zerkleinerung die Stoffeigenschaften (Dichte u. a.) gegenüber den Oberflächenerscheinungen (s. Zerkleinern) ganz zurücktreten. Einen Ausweg aus dieser Schwierigkeit bietet das F. Es beruht eben gerade auf der Ausnutzung von Oberflächeneffekten, die man bis zu einem gewissen Grade willkürlich beeinflussen kann. Das zu flotierende Gut wird fein gemahlen und in Wasser suspendiert. Dieser so entstandenen T r ü b e werden bestimmte Chemikalien (S a m m l e r) zugesetzt. Die in der Schwebe befindlichen Mineralteilchen – und nur diese, nicht aber diejenigen der begleitenden Gangart – adsorbieren den Sammler und werden dadurch schwer benetzbar (hydrophob), also wasserabweisend. Infolgedessen neigen sie dazu, an Gasblasen zu haften. Wenn man nun noch ein oberflächenaktives, also schaumbildendes Mittel (S c h ä u m e r) zusetzt, werden die Mineralteilchen sich an diesen Gasblasen festsetzen, die Partikel der Gangart jedoch nicht. Sorgt man dafür, daß der Schaum genügend stabil und gleichzeitig feinblasig ist, also eine genügend große tragfähige Oberfläche erhält, kann man durch Trennung von Schaum und Flüssigkeit das zu gewinnende Mineral von der Gangart bequem abtrennen. Es genügen erstaunlich geringe Mengen des Sammlers (eine Monoschicht von heteropolaren Ionen ist ausreichend), um den Effekt zu erreichen. Während man früher glaubte, daß es eine natürliche Unbenetzbarkeit (Hydrophobie) gäbe, wurde nachgewiesen, daß das nicht zutrifft. Es sind stets Sammler in irgendeiner Form notwendig (bzw. schon vorhanden). Um einen Stoff unbenetzbar zu machen, müssen auf seine Oberfläche heteropolare Moleküle (oder Ionen) gebracht werden, deren polare Gruppe adsorptionsfähig ist (COOH) und deren unpolarer Anteil aus schwer benetzbaren Kohlenwasserstoffketten besteht. Ähnliches gilt für die

Schäumer: Ihre oberflächenaktive Wirkung führt zur Anreicherung an der Grenzfläche Wasser/Luft und schafft damit die Voraussetzung zur Bildung haltbarer Blasen. Hier taucht die polare, wasserlösliche Gruppe ins Wasser und der unpolare Teil ragt in die Luft („Molekülbürste“). Zusätze an Sammler und Schäumer von 2 bis 10 g je Tonne Erz genügen meist schon. Die üblichen Schäumer sind meist Terpenderivate, die Sammler meist Xantate. – Die Flotationsmaschinen bestehen meist aus mehreren hintereinandergeschalteten Zellen („Stammbaum“), in denen die Mischung von Wasser, Erz und Luft durch Einblasen von Druckluft oder durch *Rühren (heute bevorzugte Methode) herbeigeführt wird. Das zu gewinnende, im Schaum aufschwimmende Erz wird oben abgezogen. [2]

engl.: flotation

franz.: flottation

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. – W. Petersen, Schwimmaufbereitung, Leipzig, 1936. – A. F. Taggart, Handbook of Mineral Dressing I, London und New York, 1948.

Fluophotometer (Fluoreszensphotometer) dienen in der Brennstoffaufbereitungschemie zur quantitativen Bestimmung sehr kleiner Urankonzentrationen. Die Uran-Strahlung wird in entsprechenden Fluoreszensschichten in energieniedrigere sichtbare Strahlung umgewandelt und mittels Spezialphotometer registriert. Das Gerät wird mit definierten Lösungen bekannter Urankonzentration geeicht. [22]

engl.: fluophotometer

franz.: photomètre à fluorescence

Fluoreszenz. Durch die Absorption elektromagnetischer Strahlung werden die äußeren Elektronen der Atome angeregt, d. h. auf ein höheres Energie-Niveau gehoben. Beim Übergang der angeregten Elektronen auf ihre Grundsubstanz wird eine elektromagnetische Strahlung (F.-Strahlung) ausgesendet, deren Wellenlänge gleich oder größer ist als die der Erregerstrahlung.

F. kann auch durch Korpuskularstrahlung angeregt werden. [3]

engl.: fluorescence *franz.: fluorescence*

Fluoreszenzschirm

Fluoreszenzschirm, mit einem Leuchtstoff versehene Fläche, die zum Nachweis von Strahlung verwendet wird. Der Leuchtstoff bewirkt die Umwandlung von Strahlung in sichtbares Licht. Zum Nachweis von Röntgen-Strahlen werden meistens F.e aus *Bariumplatincyanür verwendet; zum Nachweis von Kathodenstrahlen nimmt man Cadmium-Zink-Sulfid, das mit Silber aktiviert ist. [17]
engl.: fluorescence screen
franz.: écran fluorescent

Fluorierung, s. Uranfluorierung.
engl.: fluorination *franz.: fluoruration*

Fluorid-Ion (F^-), s. Korrosion.

Fluß (Neutronenfluß). 1. Definition. Unter F. im Sinne der *Transporttheorie versteht man das Produkt Teilchendichte · Geschwindigkeit der Teilchen, integriert über alle Bewegungsrichtungen der Teilchen. Als Formel gilt

$$\Phi(E, \mathfrak{r}) = \int n(E, \mathfrak{r}', \Omega) \cdot v \, d\Omega \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} . \qquad (1)$$

Hier bedeutet $n(\mathfrak{r}', \Omega)$ die Zahl der Teilchen (Neutronen), bezogen auf die Volumeinheit, die sich an der Stelle $\mathfrak{r}'$ befinden und nach $\mathfrak{r}$ bewegen (Richtung Ω), d. h. das Produkt $n(\mathfrak{r}', \Omega) \cdot v$ ist die Zahl derjenigen Teilchen, die in der Zeiteinheit von $\mathfrak{r}'$ nach $\mathfrak{r}$ gelangen. Die Gesamtzahl der in ein Volumelement dv bei $\mathfrak{r}$ je Sekunde aus allen Richtungen einfallenden Teilchen der Energie E ist dann das obige Integral.
Die elementare Diffusionstheorie nimmt an, daß in (1) die Teilchendichte $n(E, \mathfrak{r}', \Omega)$ durch die Teilchendichte $n(E, \mathfrak{r}, \Omega)$, also dieselbe Größe an der Stelle $\mathfrak{r}$, ersetzt werden kann. Damit wird die Definition mathematisch wesentlich einfacher:

$$\Phi(E, \mathfrak{r}) = \int n(E, \mathfrak{r}, \Omega) \cdot v \, d\Omega . \qquad (2)$$

Wenn die Geschwindigkeit v von der Richtung nicht abhängt, ist

$$\Phi(E, \mathfrak{r}) = \int n(E, \mathfrak{r}, \Omega) \, d\Omega \cdot v = n(E, \mathfrak{r}) \cdot v , \qquad (3)$$

$n(E, \mathfrak{r})$ ist die Zahl der Teilchen mit der Energie E und beliebiger Bewegungsrichtung an der Stelle $\mathfrak{r}$, bezogen auf das Einheitsvolumen. Zur Vereinfachung (2) ist

man dann berechtigt, wenn über Strecken $\mathfrak{r}' - \mathfrak{r} \approx 2$ bis 3 freie Weglängen eine Homogenität der Neutronenintensität und -verteilung über die Richtung herrscht. Das ist in der Regel im Inneren eines Mediums, nicht aber an den Grenzen erfüllt. Daher ist für die Beschreibung der Neutronendiffusion in einem Reaktor (2) und (3) ohne weiteres für das Innere, nicht aber an der Oberfläche und nur mit Vorsicht an Grenzflächen, wie der von Spaltzone und Reflektor anzuwenden (s. Albedo). – Vom F. ist der Begriff *Stromdichte sorgfältig zu unterscheiden, der dieselbe Dimension wie F. hat.

2. Flußverteilung über die Energie im Reaktor. Man unterscheidet gewöhnlich einen schnellen F. Φ_1 und einen thermischen F. Φ_2 (Zwei-Gruppen-Diffusionstheorie). Der schnelle F. umfaßt den Bereich, in dem die Bremsung durch Kernstöße wesentlich ist, während der thermische F. durch die Wärmebewegung der Kerne des Mediums bestimmt ist. Der schnelle F. verteilt sich über die Energie etwa wie

$$\Phi(E) = \frac{Q}{\xi \cdot \Sigma_s \cdot E}, \tag{4}$$

wobei Q die Quellstärke und $\xi\,\Sigma_s$ das *Bremsvermögen ist. An den Energiewerten, an denen eine starke Neutronenabsorption herrscht, z. B. den Resonanzstellen des Uran 238 hat diese Verteilung löcherähnliche Senken. Bei einer integralen Betrachtung kann man diese ignorieren. Der thermische F. verteilt sich über die Energie gemäß

$$\Phi(E) = \frac{2\pi\,\Phi_2\sqrt{E}}{(\pi k T)^{3/2}} \cdot e^{-E/kT} \tag{5}$$

(Maxwell-Boltzmannsche Energieverteilung; Φ_2 ist die Gesamtheit der vorhandenen thermischen Neutronen, $\Phi_2 = \int \Phi \, dE$).

Der thermische F. ist das große Neutronenreservoir, in das die schnellen Neutronen am Ende ihres Bremsweges einmünden. Die Höhe dieses thermischen Neutronenreservoirs ist durch das Gleichgewicht zwischen Zufluß aus höheren Energiebereichen, also der *Bremsdichte, und der Absorption $\Sigma_a\,\Phi_2$ bestimmt.

 Der Übergang vom thermischen zum schnellen F. liegt

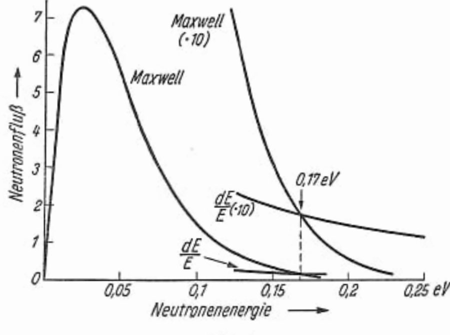


Abb. 1

bei 0,17 eV. Diese Zahl ist bei den in der Praxis vorkommenden Werten ξ, Σ_s, Σ_a für alle Reaktoren gleich (s. Abb. 1).

3. Flußverteilung über den Ort im Reaktor. Bei einem nackten, kugelförmigen Reaktor (Radius R) liefert die Diffusionsgleichung eine Verteilung des schnellen und thermischen F.s gemäß

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \frac{\sin \pi r/R}{r}.$$

An der Stelle $r = R$ (unter Einschluß der Extrapolationsstrecke) ist $\Phi = 0$, s. a. Flußwölbung.

Wird der Reaktor mit einem Reflektor umgeben, so verändern sich die Flüsse beträchtlich. Sie werden erst an der Reflektoroberfläche 0. Von den schnellen Neutronen werden viele im Reflektor thermisch, ohne daß dem eine so große Absorption wie im Reaktorinneren gegenüberstünde. Daher bildet sich das in Abb. 2 wiedergegebene Maximum aus. Von dort strömen thermische Neutronen in das Reaktorinnere zurück und verbessern die Neutronenbilanz. Dieser quantitativ bedeutungsvolle Effekt ist natürlich nur mit einer Mehrgruppentheorie zu erfassen und zeigt die Notwendigkeit, daß bei der Berechnung des kritischen Radius mindestens zwei Neutronengruppen in Betracht gezogen werden müssen (s. Gruppendiffusionsmethode).

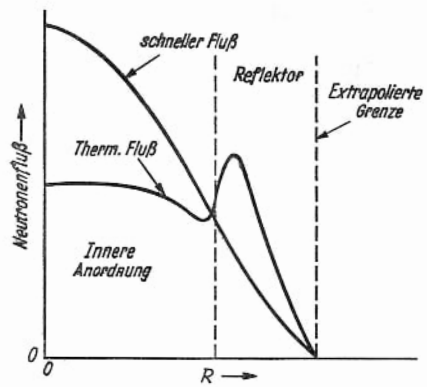


Abb. 2. Thermischer und schneller Fluß in Funktion des Radius.

Der hier beschriebene Fluß ist eine skalare Größe. Ihm tritt in der höheren Diffusionstheorie ein *Vektorfluß zur Seite.

Der Neutronenfluß im Zentrum eines *Leistungsreaktors liegt bei $10^{12}\,\mathrm{cm^{-2}\,s^{-1}}$. Bei *Prüfreaktoren wird er so hoch wie möglich getrieben und geht über $10^{14}\,\mathrm{cm^{-2}\,s^{-1}}$ hinaus. Wesentlich größere Flüsse treffen auf Material- und Wärmeableitungsschwierigkeiten. S. a. Pile-Faktor. [7]

engl.: flux

franz.: flux

Lit.: W. Riezler u. W. Walcher, Kerntechnik, B. G. Teubner, Stuttgart, 1958. – F. Cap, Physik und Technik der Atomreaktoren, Springer, Wien, 1957. – R. L. Murray, Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1957.

Fluß, jungfräulicher bezeichnet den Neutronenfluß, wie er von einer Neutronenquelle ausgeht. Bei ihm ist die Energieverteilung noch nicht durch Stöße mit Atomkernen verzerrt worden. [7]

engl.: virgin flux

franz.: flux vierge

Fluß, mikroskopischer, s. Nachtrag.

Flußabflachung, konstruktive Maßnahme, die zu einem möglichst konstanten Wert des thermischen Neutronenflusses (nicht seiner Feinstruktur) oder der Leistung in der Spaltzone des Reaktors führt. Daran

ist man vor allem bei Leistungsreaktoren interessiert. Es stehen dazu folgende Mittel zur Verfügung:

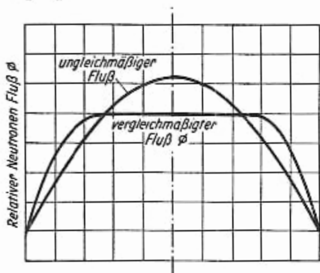
Einführung von Absorbermaterial für Neutronen (z. B. Stahl) an Stellen hohen Flusses,

zweckmäßige Anordnung der Regelstäbe,

Verwendung angereicherten Brennstoffs in den äußeren Gebieten der Spaltzone,

zweckmäßiges Umsetzen der verschieden stark abgebrannten Brennstoffelemente.

Praktisch kann man die F. nur in einem gewissen inneren Gebiet der Spaltzone verwirklichen, dessen optimale Größe von der Reaktorkonstruktion abhängt (s. Abb.). [21]



engl.: flattening

franz.: nivellement du flux, flattening

Flüssigkeitstemperatur, mittlere. Zur Beschreibung des Wärmeübergangs an einer Heizfläche ist es üblich, die Beziehung

$$q = \alpha\ (\vartheta_W - \vartheta_F)$$

zu benützen, wobei q die Heizflächenbelastung, α die Wärmeübergangszahl, ϑ_W die Wandtemperatur und α die Flüssigkeitstemperatur ist. Bei einer Rohrströmung variiert jedoch die Flüssigkeitstemperatur über dem Querschnitt und man hat daher ϑ_F zu definieren. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten:

a) Temperatur in der Rohrachse;

b) mittlere Temperatur, bezogen auf den Querschnitt f,

$$\vartheta_F = \frac{1}{f} \int_f \vartheta \, \mathrm{d}f\ ;$$

c) mittlere Temperatur, bezogen auf den Flüssigkeitsstrom,

$$\vartheta_s = \int_f \vartheta\, w\, \mathrm{d}f \Big/ \int_f w\, \mathrm{d}f\,,$$

wobei die Axialgeschwindigkeiten w an jeder Stelle bekannt sein müssen;

d) mittlere Temperatur, bezogen auf den Wärmemassenstrom

$$\vartheta_M = \int_f \vartheta\, \varrho\, c_p\, w\, \mathrm{d}f \Big/ \int_f w\, \varrho\, c_p\, \mathrm{d}f\,,$$

wobei ϱ die Dichte und c_p die spezifische Wärme ist. *(engl.: bulk* oder *mixing cup temperature.)*

Da ϑ_M in einer Mischvorrichtung hinter dem Querschnitt gemessen werden kann, ist sie wohl die gebräuchlichste Definition der Flüssigkeitstemperatur. Als Stoffwerttemperatur wurde bei der turbulenten Rohrströmung experimentell der Wert

$$\vartheta^* = \vartheta_F - \frac{0{,}1\,\mathrm{Pr} + 40}{\mathrm{Pr} + 72}\,(\vartheta_F - \vartheta_W)$$

ermittelt. Jedoch wird auch häufig der leicht zu berechnende Wert

$$\vartheta^* = \frac{\vartheta_F + \vartheta_W}{2}$$

verwendet (*engl.: film temperature*), der für $\mathrm{Pr} = 10$ aus der obigen Gleichung hervorgeht. [5]
engl.: mean liquid temperature
franz.: température moyenne (d'un liquide)

Flüssigkeitszählrohr, becherartiges Zählrohr zur Messung von radioaktiven Flüssigkeiten. [16]

Flußmittel. F. bestehen im allgemeinen aus anorganischen Verbindungen, z. B. aus Chloriden und Oxyden von Natrium, Kalium, Kalzium, Lithium usw., die beim Schweißen und Löten zugegeben werden. Sie lösen die Oxyde an der Metalloberfläche bzw. schützen die blanken Oberflächen vor Oxydation und ermöglichen somit eine gute metallische Verbindung. Beim Schmelzen werden F. verwendet zum Schutz gegen Oxyd- und Gasaufnahme, zur Verhinderung des Aus-

brandes und zur Entfernung von Oxyden und Gasen aus der Schmelze. [4]

engl.: flux
franz.: fondant (beim Schmelzen),
flux (beim Schweißen)

Flußumwandler oder **Flußkonverter.** Als F. wird eine kleine Menge spaltbarer Substanz bezeichnet, die man in die thermische Säule eines Reaktors einbringen kann, und die dort lokal einen schnellen Fluß erzeugt. [7]

engl.: flux converter, neutron converter
franz.: convertisseur de flux, c. de neutrons

Flußwölbung. 1. Geometrische F.
Die g. F. ist in ihrer engen, meist gebrauchten Fassung der kleinste Eigenwert der Flußgleichung

$$\Delta \Phi + B^2 \Phi = 0 , \tag{1}$$

der durch die Randbedingungen eines nackten Reaktors festgelegt ist.
$B \equiv B_g$ ist eine Funktion der Abmessungen des Reaktors. Die Bezeichnung stammt vom englischen *buckling.* Für die einfachsten Formen von nackten Reaktoren lauten die kleinsten Eigenwerte folgendermaßen:

kugelförmiger Reaktor:

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2 \qquad R \text{ Kugelradius}$$

zylindrischer Reaktor:

$$B_g^2 = \left(\frac{2{,}405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \qquad \begin{cases} R \text{ Radius der Grundfläche} \\ H \text{ Höhe des Zylinders} \end{cases}$$

rechteckiger Reaktor:

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c}\right) \qquad a, b, c \text{ Kantenlängen}$$

Alle Längen sind einschließlich der Extrapolationsstrecken zu verstehen. Sowohl B als auch B^2 werden als F. bezeichnet.

Die Größe von F. charakterisiert die Krümmung des Flusses. Die Lösung von (1) für die oben erwähnten drei Fälle ist:

kugelförmiger Reaktor:

$$\Phi = \Phi_0 \frac{\sin B_g r}{r} = \Phi_0 \frac{\sin \pi r/R}{r}$$

rechteckiger Reaktor:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot J_0 \left(\frac{2{,}405\, r}{\mathrm{R}} \right) \cdot \cos \frac{\pi z}{H}$$

zylindrischer Reaktor:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \cos \frac{\pi x}{c} \cdot \cos \frac{\pi y}{b} \cdot \cos \frac{\pi z}{a}$$

Bei Reaktoren mit Reflektor ist der Eigenwert aus den Anschlußbedingungen an der Grenze zum Reflektor zu berechnen, was durchweg auf eine transzendente Gleichung führt.
engl.: geometric buckling
franz.: laplacien géométrique
2. Materiell bestimmte F. B_m.
Als m. F. bezeichnet man den Wert von $B \equiv B_m$ in der Gleichung

$$\frac{k \cdot \mathrm{e}^{-B^2 \tau}}{1 + L^2 B^2} = 1\,. \tag{2 a}$$

Es bedeuten: L die Diffusionslänge
τ das Fermi-Alter
k den Vermehrungsfaktor

An Stelle der Gl. (2 a) schreibt man mitunter unter Ausnutzung der Tatsache, daß $B^2 \tau$ für die meisten Reaktoren eine kleine Zahl ist,

$$\frac{k}{1 + B^2 (L^2 + \tau)} = 1\,. \tag{2 b}$$

Die Gln. (2) folgen aus der Fermischen Alterstheorie. Allgemeinere Formulierungen findet man unter Transporttheorie und Reaktorstörungsrechnung.
Da die Größen k, L, τ durch die Materialien im Reaktor bestimmt sind, ist $B = B_m$ allein von Materialdaten abhängig. Daher spricht man hier im Gegensatz zur geometrischen von der m. F.
Beim nackten Reaktor fordert die kritische Bedingung, daß die geometrische F. gleich der aus (2) berechneten m. F. ist.

Ist $B_g < B_m$, so ist der Reaktor überkritisch,
$B_g = B_m$, so ist der Reaktor kritisch,
$B_g > B_m$, so ist der Reaktor unterkritisch.

3. Die Unterscheidung zwischen geometrischer und materiell bestimmter F. ist nur bei der Eingruppentheorie üblich. Bei anderen Theorien bzw. Modellen spricht man nur von der F., da man in erster Linie den kritischen Zustand berechnet und dabei von der Gleichheit von B_g und B_m von vornherein Gebrauch macht. S. kritische Gleichung. [7]

engl.: material Buckling

franz.: laplacien-matière

Lit.: W. Riezler u. W. Walcher, Kerntechnik, Teubner, Stuttgart, 1958. – F. Cap, Physik und Technik der Atomreaktoren, Springer, Wien, 1957. – R. L. Murray, Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1957. – S. Glasstone u. M. C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, McMillan, London, 1952.

Flußwölbungsvektor wird gebildet von der *i*. Komponente der Flußwölbung zusammen mit dem *i*. Einheitsvektor.

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{i} \cdot B_x + \mathfrak{j} \cdot B_y + \mathfrak{k} \cdot B_z .$$

Für einen quaderförmigen Reaktor gilt für die Komponenten:

$$B_x = \frac{\pi}{a}, \quad B_y = \frac{\pi}{b}, \quad B_z = \frac{\pi}{c}.$$

[7]

engl.: buckling vector

franz.: vecteur buckling

Flußzeit, knappe Redeweise für das Zeitintegral des Flusses. Die Anzahl der Spaltungen, die insgesamt während der Reaktorbetriebsdauer t stattgefunden haben, ist proportional dem Zeitintegral

$$\Theta = \int \Phi \, dt = \overline{\Phi} \, t = \overline{n} \, \overline{v} \, t \text{ [Neutronen/cm}^2\text{]},$$

wobei $\overline{n}$ die mittlere Neutronendichte (je Volumeneinheit) und $\overline{v}$ die mittlere Neutronengeschwindigkeit bedeuten. Dieser Ausdruck ist daher ein Maß für die Energie, die dem Reaktor entnommen worden ist, so daß als Einheit MWd/t (Megawatt-Tage/Tonne Brennstoff) benutzt werden kann.

Für Natururan im thermischen Reaktor, in dem sich

noch kein Plutonium gebildet hat, gilt die Umrechnung

$$1\ \frac{\text{MWd}}{\text{t U}_{\text{nat}}} \triangleq 2{,}48 \cdot 10^{17}\ \frac{\text{Neutr.}}{\text{cm}^2}\,.$$

Sobald eine nennenswerte Plutoniumproduktion erfolgt, gilt diese Umrechnung nicht mehr, da sich die makroskopischen Wirkungsquerschnitte Σ ändern. [12]
engl.: flux time *franz.: intégrale du flux*

Fluten des Reaktors, äußerste Notmaßnahme zur Erzielung einer Notkühlung, bei der der Reaktor völlig unter Wasser gesetzt wird. Das **F.** soll eine minimale Kühlung der Nachwärme auch dann noch garantieren, wenn außer der normalen Kühlung auch noch alle speziellen Notkühlkreisläufe ausgefallen sind. Es kommt wegen der fast unvermeidlichen und nur sehr schwer zu beseitigenden Verseuchungen der gesamten Reaktoranlage nur als allerletzte Notmaßnahme in Frage. S. a. Notkühlung. [9]
engl.: flooding *franz.: noyer*

fog flow method, s. Druckverlust.

Fokker-Planck-Gleichung, s. Nachtrag.

Fokussierung, starke, ein neues Hilfsmittel zum Bau von Beschleunigern, insbesondere Synchrotrons extrem hoher Endenergie. Der Teilchenstrahl wird hierbei durch ein speziell geformtes Magnetfeld mit alternierendem Gradienten (daher auch die Bezeichnung AG-Beschleuniger für solche Geräte), das abwechselnd fokussierend und defokussierend wirkt, dauernd auf einem sehr kleinen Querschnitt gehalten. Dadurch kann man an den Querdimensionen der Ringröhre und des Ringmagneten sparen und dafür größere Ringe bauen, also höhere Endenergien erreichen. [1]
engl.: strong focussing *franz.: focalisation*
Lit.: s. Synchrotron.

Fontenay aux Roses, s. Chatillon.

Formfaktoren, Faktoren, mit deren Hilfe von einem idealen Reaktorgitter mit homogener Flußverteilung auf ein reales Gitter mit inhomogener Verteilung geschlossen werden kann. In diesem Sinne kann z. B. in der Formel $k_{\text{eff}} = W \cdot k$ die Wahrscheinlichkeit W, daß ein Neutron den Reaktor nicht verläßt, als **F.** aufgefaßt werden.

Formfaktoren F. verwendet man insbesondere bei der Ermittlung der Reaktorleistung P durch Integration über die *Leistungsdichte p

$$P = \int_R p \, \mathrm{d}V = \varkappa E \int_R \Sigma_f \Psi \, \mathrm{d}V ,$$

wobei Σ_f den Spaltquerschnitt, Ψ den Neutronenfluß, $\varkappa$ den in der Spaltzone freiwerdenden Energieanteil und E einen Umrechnungsfaktor (z. B. $2{,}9 \cdot 10^{-11}$ Ws) bedeuten. Kann man Ψ in der Form

$$\Psi(r, z) = \Phi_0 \cdot \Phi_r(r) \cdot \Phi_z(z) \cdot \varphi(r)$$

darstellen und ist Σ_f in den Brennstoffelementen konstant, so tritt bei der Bestimmung der Leistung in dem bei $r = r_i$ liegenden Kühlkanal der Ausdruck

$$\int_{\mathrm{Br}} \Psi \, \mathrm{d}V_i = \Phi_0 \, \Phi_r(r_i) \int \Phi_z \, \mathrm{d}_z$$

$$\int \varphi \, \mathrm{d}f = \Phi_0 \, \Phi_r(r_i) \, \overline{\Phi}_z \, V_i \, \overline{\varphi}_{\mathrm{Br}}$$

auf. V_i bedeutet das Volumen des Brennstoffstabes, $\overline{\Phi}_z$ den axialen Flußmittelwert und $\overline{\varphi}_{\mathrm{Br}}$ den Mittelwert des mikroskopischen Flusses im Brennstoff. $\overline{\varphi}_{\mathrm{Br}}$ läßt sich mit dem Flußmittelwert im Moderator $\overline{\varphi}_M \approx 1$ und einem F., definiert durch

$$F_n = \overline{\varphi}_M / \overline{\varphi}_{\mathrm{Br}} \approx 1/\overline{\varphi}_{\mathrm{Br}}$$

ausdrücken, der in der mikroskopischen *Reaktortheorie als Absenkungsfaktor bekannt ist. Durch

$$F_z = \Phi_{z_0} / \overline{\Phi}_z = 1/\overline{\Phi}_z$$

kann man einen weiteren F. einführen und erhält

$$\int_{\mathrm{Br}} \Psi \, \mathrm{d}V_i = \frac{\Phi_0 \, V_i}{F_n \, F_z} \, \Phi_r(r_i) .$$

Beim großen nackten Zylinder-Reaktor ist z. B. $F_z \approx 1{,}57$. Bei der Summation über alle Brennstoffkanäle, die man beim großen Reaktor näherungsweise durch eine Integration ersetzen kann, ist es zweckmäßig, durch $F_r = \Phi_{r0} / \overline{\Phi}_r = 1/\overline{\Phi}_r$ einen dritten F. einzuführen, so daß

$$\sum_i \int_{\mathrm{Br}} \Psi \, \mathrm{d}V_i \approx \frac{\Phi_0 \, \overline{\Phi}_r \, V_{\mathrm{Br}}}{F_n \, F_z} = \frac{\Phi_0 \, V_{\mathrm{Br}}}{F_n \, F_z \, F_r} = \mu \cdot V_{\mathrm{Br}} \, \Phi_0 .$$

Das Raumintegral über den i. a. inhomogenen Fluß kann also ersetzt werden durch die über den Maximalfluß, multipliziert mit einem Gesamt-F. μ.
Das hier vom Fluß gesagte bezieht sich in analoger Weise auch auf flußabhängige Größen, wie Leistungsdichte, Wärmeproduktion usw. S. a. Kühlkanal, gefährdeter. Formeln und Zählwerte sind aus der Literatur zu entnehmen. [13]
engl.: form factors *franz.: facteurs de forme*
Lit.: C. F. Bonilla, Nuclear Engineering, McGraw-Hill, New York, 1957.

Forschungsreaktor ist ein Reaktor, der in erster Linie Forschungszwecken dient, seien es nun physikalische, technische, chemisch-medizinische oder biologische Experimente. Außerdem dient er zur Isotopenherstellung.
Die Forschung ist vor allem an der großen Zahl von Neutronen, die ein Reaktor produziert, interessiert. Um eine möglichst große Neutronenintensität auf die zu untersuchenden Proben wirken zu lassen, besitzt ein F. eine Anzahl von Kanälen in das Reaktorinnere, in denen die schnellen Neutronen stark vertreten sind. Für Untersuchungen mit thermischen Neutronen steht die thermische Säule zur Verfügung. Diese besteht aus Moderatorsubstanz (schweres Wasser oder Graphit). Sie ist so dick, daß an der dem inneren Teil des Reaktors abgewandten Seite praktisch ausschließlich thermische und keine schnellen Neutronen vorhanden sind, d. h. daß das *Cadmium-Verhältnis der Neutronen dort groß ist.
Aus der Art der Experimente, für die der F. besonders geeignet sein soll, ergeben sich eine Reihe von Forderungen an seine Konstruktion, wie z. B.:

a) Höhe des Neutronenflusses und ungestörte Flußverteilung in den Experimentierkanälen.

b) Für Experimente verfügbare Überschußreaktivität.

c) Steifigkeit des Neutronenflusses bei Durchführung eines Experiments (Neutronenpotential).

d) Größe des für Experimente verfügbaren Volumens in der Spaltzone und im Reflektor.

e) Zweckentsprechende Konstruktion der Experimentierkanäle und -einrichtungen.

f) Ausmaß an Sicherheit, das vor allem den möglichen Störungen durch die vorgesehenen Experimente Rechnung trägt.

Die Wahl des Reaktortypes und seiner Auslegungsparameter ist so vorzunehmen, daß alle derartigen aus seinem Zweck folgenden Bedingungen möglichst gut erfüllt sind, d. h. er ist in bezug auf diese zu optimalisieren.

Die wichtigsten Typen von F., die bis jetzt gebaut wurden, sind:

1. H_2O-Reaktoren:

a) *Wasserkessel-Reaktor (homogener Reaktor), Leistung $\gtrsim$ 50 kW, gut geeignet für: physikalische Experimente, Herstellung kurzlebiger Isotope, chemische Experimente (Wasserzersetzung). Vertreter dieses Types in Deutschland ist der *FRF und FRB.

b) Wasserbecken-Reaktor (heterogener Reaktor), Leistung $\sim$ 1 MW, hat viele Zugangsmöglichkeiten für Vielzahl von Experimenten. Von den deutschen Reaktoren gehört hierher der *FRM und der FRH.

2. D_2O-Reaktoren:

a) NRX- bzw. NRU-Typ (heterogen, natürliches Uran), Leistung bis zu mehreren 10 MW. Wegen seines hohen Flusses und großen Experimentiervolumens für eine Vielzahl von Experimenten ebenso geeignet wie für Isotopenherstellung. In Deutschland: *FR-2 in Karlsruhe.

b) *CP-5- und *Dido-Typ (heterogen, angereichertes U) ist besonders für physikalische Grundlagenforschung und Industrieforschung geeignet. In Deutschland für das Reaktorzentrum in Düren/Rheinland vorgesehen.

3. Graphit-Reaktoren:

*Bepo-Typ: Für Experimente, die einen nicht zu hohen N-Fluß benötigen, geeignet. Großes Experimentiervolumen. Isotopenproduktion.

Neben dem F. stehen der *Materialprüfreaktor und der *Leistungsreaktor. Der erste dient der Überprüfung von Materialien unter Einwirkung eines möglichst hohen Neutronenflusses. Er hat mit dem allgemeinen F. einen zentralen Strahlenkanal gemeinsam. Der zweite hat keine Strahlenkanäle und ist für möglichst günstige Energie- und evtl. Plutoniumerzeugung ausgelegt.

Schließlich gibt es an den Reaktorentwicklungsstellen eine Vielzahl von *Nullreaktoren und *Exponentialexperimenten, die der Reaktorentwicklung dienen. – F.n in Deutschland sind der *FRM, *FRF, FRH, FRB, die Reaktoren im Dürener Raum und im Reaktorzentrum Karlsruhe. [7, 21]

engl.: research reactor

franz.: pile expérimentale, réacteur expérimental

Lit.: W. Riezler u. W. Walcher, Kerntechnik, B. G. Teubner, Stuttgart, 1958.

Fourier-Transformation, ein wichtiges Hilfsmittel zur Integration von Differentialgleichungen. In der Reaktortheorie wird verschiedentlich von der F. Gebrauch gemacht, z. B. bei der Lösung der *Bremsgleichung, der *Reaktorgleichung usf. Gegeben sei eine Funktion $F(x)$, die nur wenig Einschränkungen unterworfen sein muß. Sie wird einer F.-T. unterworfen, indem man sie mit e^{ipx} multipliziert und über x integriert:

$$f(p) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ipx} F(x)\,dx\,.$$

Die entstehende Funktion $f(p)$ heißt Fourier-Transformierte oder auch Spektralfunktion von $F(x)$. Der letzte Ausdruck erklärt sich daraus, daß die Funktion $F(x)$ in der Umkehrung der F.-T.

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ipx} f(p)\,dp$$

als Überlagerung von harmonischen Schwingungen dargestellt ist.

Die F.-T. kann auf drei Dimensionen verallgemeinert werden. Es sei $\mathfrak{p} = \mathfrak{i}\,p_x + \mathfrak{j}\,p_y + \mathfrak{k}\,p_z$ ein variabler Vektor. Dann kann die dreidimensionale F. durch

$$F(\mathfrak{p}) = \int e^{i(\mathfrak{p}\,\mathfrak{r})} F(\mathfrak{r})\,d\mathfrak{r}$$

definiert werden. Die zugehörige Umkehrungsformel lautet

$$f(\mathfrak{r}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int e^{-i(\mathfrak{p}\,\mathfrak{r})}\ f(\mathfrak{p})\,d\mathfrak{p}\,.$$

Fourier-Transformation

Die Integration ist im ersten Fall über den ganzen Raum, im zweiten über den $\mathfrak{p}$-Raum zu erstrecken.

Als Anwendungsbeispiel soll die in der Reaktortheorie häufig auftretende Amplitudengleichung

$$\Delta F(\mathfrak{r}) + B^2 F(\mathfrak{r}) = 0$$

einer F.-T. unterworfen werden. Als Randbedingung sei das Verschwinden der Funktion $F(\mathfrak{r})$, z. B. des Neutronenflusses am Rand eines endlichen Gebietes vorgeschrieben. Diese Randbedingung führt bekanntlich dazu, daß die Amplitudengleichung nur für eine diskrete Reihe von Eigenwerten B_n^2, denen Eigenfunktionen $F_n(\mathfrak{r})$ entsprechen, erfüllt werden kann. Nach diesen Eigenfunktionen kann $F(\mathfrak{r})$ entwickelt werden. Die Gleichung für eine dieser Eigenfunktionen lautet

$$\Delta F_n(\mathfrak{r}) + B_n^2 F_n(\mathfrak{r}) = 0 .$$

Sie wird durch eine dreidimensionale F.-T. übergeführt in

$$(B_n^2 - p^2) f_n(\mathfrak{p}) = 0 .$$

Daraus folgt, daß $f_n(\mathfrak{p})$ nur für den Fall

$$p^2 = |\mathfrak{p}|^2 = B_n^2$$

verschieden von Null ist. B_n ist hier als der Betrag des *Vektors der Flußwölbung $\mathfrak{B} = \mathfrak{i} B_x + \mathfrak{j} B_y + \mathfrak{k} B_z$ aufzufassen. Die Umkehrung der F.-T. führt zu

$$F_n(\mathfrak{r}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int e^{-i(\mathfrak{B}_n \mathfrak{r})} f_n(\mathfrak{p}) \, d\mathfrak{p} .$$

Wie bei der *Laplace-Transformation gibt es auch bei der F.-T. einen F a l t u n g s s a t z, der in der Bremstheorie Anwendung findet. Unter $P_n(\mathfrak{r}_n - \mathfrak{r}_{n-1})$ sei die Wahrscheinlichkeit dafür verstanden, daß ein Neutron der Energie E_{n-1}, welches sich am Ort $\mathfrak{r}_{n-1}$ befindet, nach einer Reihe von Bremsstößen am Ort $\mathfrak{r}_n$ mit der Energie E_n erscheint. Durch eine Faltung von derartigen ineinandergreifenden Bremskernen

$$P(|\mathfrak{r}_n - \mathfrak{r}_0|) = \int\int \ldots \int P_1(|\mathfrak{r}_1 - \mathfrak{r}_0|) \cdot \\ \cdot P_2(|\mathfrak{r}_2 - \mathfrak{r}_1|) \ldots P_n(|\mathfrak{r}_n - \mathfrak{r}_{n-1}|) \, d\mathfrak{r}_1 \ldots d\mathfrak{r}_{n-1}$$

kann die Abbremsung aus der nullten in die n-te Energiegruppe beschrieben werden. Durch eine F. er-

gibt sich $\overline{P}(B^2) = \overline{P_1}(B_1^2) \cdot \overline{P_2}(B_2^2) \ldots \overline{P_n}(B_n^2)$,

wobei die Fourier-Transformierten durch Querstriche gekennzeichnet sind. Die F.-T. einer Faltung führt also auf das Produkt der einzelnen Transformierten. [13]
engl.: Fourier transformation
franz.: transformation de Fourier

Lit.: C. J. Tranter, Integral Transforms in Mathematical Physics, Menthuen, London, 1956. – Tables of Integral Transforms, McGraw-Hill, New York, 1954.

Fourier-Zahl (Fo). Das dimensionslose Produkt $a\,t/l^2$, wobei a die Temperaturleitzahl, t die Zeit und l eine charakteristische Länge ist, wird allgemein als F.-Z. bezeichnet. Sie kann bei der Lösung von instationären Wärmeleitungsproblemen nützlich sein, s. Ähnlichkeitsgesetze. [5]
engl.: Fourier-No. *franz.: nombre de Fourier*

Fourmarierit. Sekundäres, rotes, bleihaltiges Uranmineral mit 77,79 % UO_3-Gehalt. [24]

FPR, s. Nachtrag.

FR-1, s. Nachtrag.

FR 2 (Forschungsreaktor 2). Großer Forschungs- und Prüfungsreaktor des Atomforschungszentrums Karlsruhe. Bau und Betrieb dieses ersten vollständig in Deutschland entwickelten und hergestellten Reaktors seit Kriegsende erfolgt durch die Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH. Karlsruhe. Der FR 2 ist eine Weiterentwicklung des bereits von der Göttinger Reaktorgruppe entworfenen *FR 1. Planungsbeginn 1956, Baubeginn 1957, Fertigstellung 1959.
Maßgeblich für Auswahl und Dimensionierung war der Bau eines leistungsfähigen Forschungsreaktors für industrielle und wissenschaftliche Zwecke unter möglichster Beschränkung auf deutsche Hilfsquellen. Es wurde ein thermischer Reaktor mit natürlichem Uran als *Brennstoff und schwerem Wasser als *Moderator gewählt. Zur genauen Information siehe: Die Atomwirtschaft, Bd. 2, Nr. 12, 1957.
1. Abschirmung, biologische (s. Abb. 1 a, b): Spaltzone: Mantel aus Schwerbeton (mittl. Dichte 3,5 g/cm³) von etwa 250 cm Dicke (minimal 180 cm). Äußerer Grundriß: unregelmäßiges Vieleck, Südteil

FR 2 (Forschungsreaktor 2)

etwa halbkreisförmig, Nordteil angenähert rechteckig. Durchmesser ungefähr 9 m, Höhe etwa 10 m (ab Hauptflur 8 m). Betonfüllung in Stahlblechgehäuse mit Profileisenversteifungen und eingeschweißten Führungsrohren. Alle Abschirmungen sind so dimensioniert, daß die austretende Strahlung in der Halle 10^{-2} bis 10^{-1} der Toleranzdosis nicht überschreitet.

2. Absetzbecken zur Abkühlung und ersten Bearbeitung verbrauchter Brennstoffelemente. Etwa 10 m langes, 3 m breites, 7 m tiefes Wasserbecken nördlich der Reaktorhalle mit 1,5 m breitem, 8 m langem und

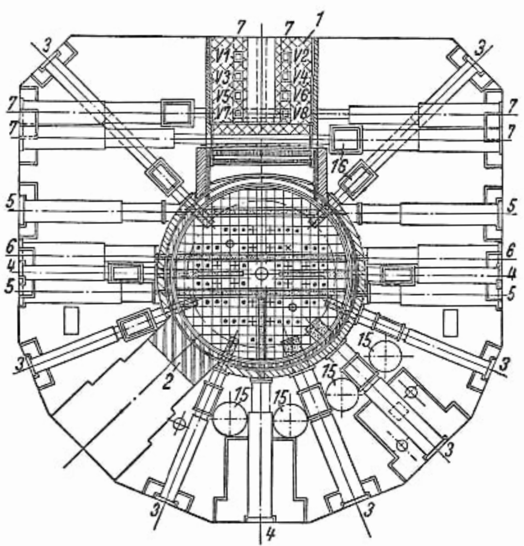


Abb. 1 a. Querschnitt durch den Reaktorblock, Maßstab ~ 1 : 80. 1. Thermische Säule. 2. Bleiabschirmung für Meßkammern. 3. Horizontale Experimentierkanäle im Reflektor. 4. Horizontale Experimentierkanäle in der Spaltzone. 5. Horizontale durchgehende Experimentierkanäle. 6. Rohrpost. 7. Horizontale Experimentierkanäle in der thermischen Säule. 8. V 1 bis V 8; vertikale Experimentierkanäle in der thermischen Säule. 9. An den Kreuzungsstellen des eingezeichneten Gitters: Hauptgitterplätze für Brennstoffelemente (158) und Thoriumstäbe (29). 10. + Trimm-Abschaltstäbe (16). 11. × Feinregelstab (1). 12. • Zwischengitterplätze für auswechselbare Isotopenbestrahlungskanäle (41). 13. ⦶ durchgehender vertikaler Zentralkanal (1). 14. o auswechselbare vertikale Fingerhüte (2). 15. ○ Rohrschächte im Betonschirm (4). 16. □ Strahlenverschlüsse.

bis zu 12,5 m tiefem Verbindungskanal (Tunnel) zum Entladeschacht im Absetzblock.

FR 2 (Forschungsreaktor 2)

3. A b s e t z b l o c k : Betonblock von annähernd gleicher Größe wie der Reaktormantel zur Aufnahme und zum Transport bestrahlter Brennstoffelemente, Abschirmpfropfen, Experimentiereinbauten, Isotopenbeladungen und zur Untersuchung und Durchleuchtung schadhafter Brennstoffelemente und Steuerstäbe (heiße Zelle).

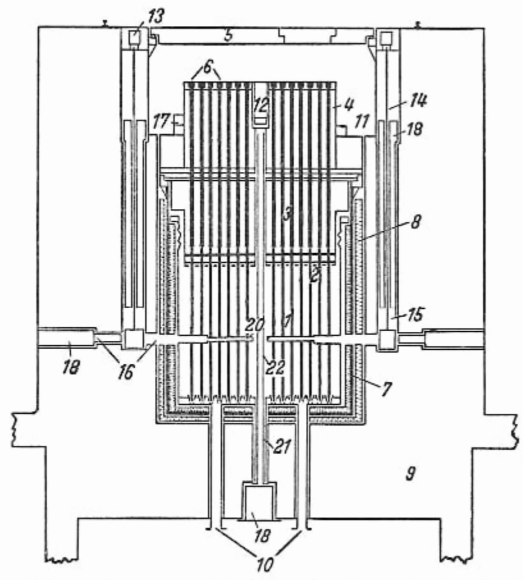
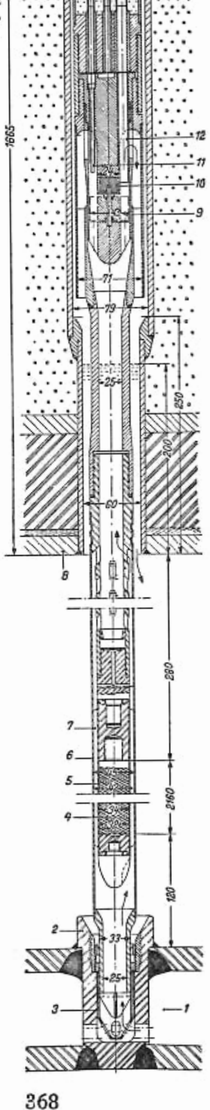


Abb. 1 b. Längsschnitt durch den Reaktorblock, Maßstab ~ 1 : 80. 1. Spaltzone. 2. Reflektor aus D_2O. 3. Deckelunterteil. 4. Deckeloberteil. 5. Oberer Drehdeckel. 6. Brennstoffelemente. 7. Stahltank (wassergekühlter thermischer Schild). 8. Luftgekühlter thermischer Schild. 9. Biologischer Schild. 10. D_2O-Zuführung (die D_2O-Abflußleitung ist im vorliegenden Schnitt nicht zu sehen). 11. Rundgang um den Deckel. 12. Senkrechter Zentralkanal. 13. Motor zum Betätigen der Strahlenverschlüsse. 14. Spindel zum Betätigen der Strahlenverschlüsse der horizontalen Experimentierkanäle. 15. Vertikale Schächte für die Strahlenverschlüsse der horizontalen Experimentierkanäle. 16. Horizontaler Experimentierkanal. 17. Ringleitung für Luft. 18. Stopfen. 19. Aluminiumtank. 20. Fingerhut. 21. Tankhülse für Experimentierkreislauf. 22. Kreislaufrohr.

FR 2 (Forschungsreaktor 2)



4. Brennstoffelemente bestehen aus auswechselbaren Einheiten aus Brennstoffstäben, Führungsrohren und Meßkammern für das Kühlwasser und dem Abschirmpfropfen (Gesamtlänge ca. 6 m, Abb. 2). Be- und Entladung erfolgt mit besonderer Ladeflasche durch das Loch des oberen Drehdeckels.

Hauptteile: a) Unterteil im Bereich der Spaltzone aus Brennstoffstab, Kühlmittelführungsrohr und Eintrittsdüse. Länge des Uranstabs 216 cm. Drei Teilstücke von 3,2 Durchmesser sind gemeinsam in einer Aluminiumschutzhülle von 0,1 cm Dicke eingelötet. Dicke des Führungsrohrs aus Aluminium 0,15 cm, Außendurchmesser 4,5 cm, Länge etwa 250 cm. Zentrierung durch drei etwa 0,25 cm dicke und 0,4 cm hohe Führungsrippen auf der Uranumhüllung.

b) Mittelteil in Höhe des unteren Deckels mit Uranstabhalterung, Meßkammer und Kühlwasserrückführung. Dort Kühlstrommessung mit Woltmannflügel, Temperaturmessung mit Thermo-

Abb. 2. Längsschnitt durch das Brennstoffelement.

1 Kühlmittel-Verteilerkammer
2 Brennstoffelementsitz
3 Kalibrierungseinsatz
4 Uranstab
5 Hülse
6 Kühlmittel-Führungsrohr
7 Kühlringspalt
8 Reaktordeckel
9 Woltmann-Flügel
10 Impulsgeber
11 Thermoelement
12 Schwerwasser-Entnahmerohr zur Hülsenüberwachung

element und Einführung der Rohrleitung zur Hülsenüberwachung und zum Notkühlen. Länge etwa 100 cm, Durchmesser 7 cm.
c) Oberteil mit Betonfüllung zur Strahlenabschirmung, gasdichtem Verschlußkopf und Anschlüssen für die Meßleitungen und das Ansaugrohr. Länge etwa 250 cm.
5. Experimentiereinrichtungen. Thermische Säule für Spezialexperimente und Großraumbestrahlungen mit ausfahrbarer Graphitfüllung, fer-

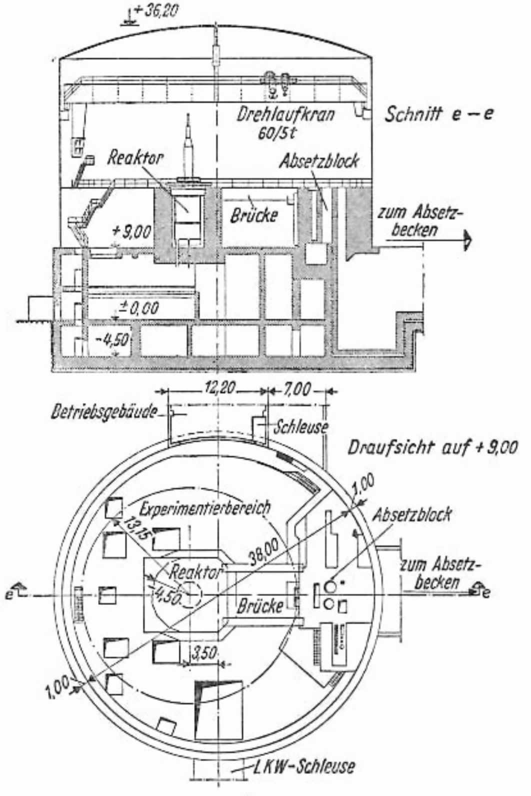


Abb. 3 a, b.
Längsschnitt und Querschnitt durch das Reaktorgebäude.

ner 20 horizontale und 33 vertikale Kanäle, davon in der Spaltzone drei durchgehend (5,5 und 20 cm ⌀), fünf radial hineinragend (Dimensionen etwa wie 13,2 × 5,4 cm); bis zu 24 auswechselbare Isotopenkanäle (3 cm ⌀) die übrigen im Reflektor und in der thermischen Säule. Ein durchgehender Kanal (5,5 cm ⌀) ist speziell für eine 200 m lange *Rohrpostleitung zu einem Speziallaboratorium vorgesehen.

6. Gebäude (Abb. 3 a, b): Zylindrischer, gasdichter Rundbau (40 m ⌀, 42 m Gesamthöhe, davon 36 m über Geländeniveau) mit Eisenbetonunterbau bis zur Höhe der Reaktorhalle (9 m über Gelände) und selbsttragender Stahlkuppel.

Der Betonsockel umfaßt drei Stockwerke, jeweils in einen Nord- und Südteil unterteilt. Unterstes Stockwerk: Nordteil: Klimaanlage, Sammeltanks für Kreisläufe; Südteil: Hülsenkontrolle. Darüberliegende zwei Stockwerke: Nordteil: Betriebskreisläufe; Südteil: Räume für Prüfkreisläufe und zugehörige Beladeeinrichtungen. Das gesamte Gebäude ruht auf einer durchgehenden Eisenbetonplatte.

7. Innere Reaktorstruktur: Quadratisches Brennstabgitter mit 189 Positionen (158 für Brennstoffelemente, die restlichen Randpositionen für Brutstäbe aus Thorium oder freibleibend als Reflektor), Abstand zwischen den Stäben (Gitter-Abstand) 16,8 cm. Elementarzelle: Uranradius 1,6 cm, Zellenradius 9,5 cm, Dicke der Aluminiumhülle 0,1 cm, Kühlwasserschicht 0,4 cm, Dicke des Aluminiumführungsmantels für das Kühlwasser 0,15 cm. Spaltzone: Höhe (= Uranstablänge) 216 cm, Durchmesser ca. 260 cm. Moderatorraum: Höhe 250 cm, Durchmesser 310 cm. Zwischengitterplätze: Gesamtzahl 41, davon 16 für *Trimmabschaltstäbe (5 cm ⌀, 210 cm Länge), 1 für Regelstäbe, 24 für Isotopenkanäle. Gesamtmenge: Uran 5 t, schweres Wasser im Tank 17,8 t (einschließlich Kühlkreislauf 23 t). Das ganze befindet sich in einem Aluminiumtank von 12 mm Wandstärke, 310 cm Durchmesser und 350 cm Höhe. Der Boden des Tanks ist als D_2O-Verteilerkammer ausgebildet.

Der Aluminiumtank ist von einem Stahltank umgeben, der als *thermischer Schild dient und zugleich den

schweren Abschirmdeckel des Reaktors trägt. Schichten des Stahltanks von innen nach außen: 7 mm *Boral (zur Neutronenabsorption), 15 mm Eisen, 60 mm Blei mit eingegossenen Kühlschlangen (Kühlung mit leichtem Wasser), 180 mm Stahl als eigentliche Stützwand. Anschließend nochmals 180 mm Eisen mit Luftkühlung, danach die Innenverschalung des biologischen Schirms.

FR 2 (Forschungsreaktor 2)

8. Kreisläufe: Vier Hauptsysteme sind zu unterscheiden.

a) Primärer (D_2O-)Kühlkreislauf besteht aus Hauptkühlkreis für Normalbetrieb zwischen den Brennstoffelementen und Wärmetauschern mit je fünf Pumpen und Wärmeaustauschern (je zwei Einheiten als Reserve), Notkühlkreis für den abgeschalteten Reaktor mit zwei kleineren Pumpen und Wärmeaustauschern, Reinigungskreislauf aus Filtern und Ionenaustauschern gegen Korrosion der Gefäße und Dissoziation des Wassers bei Verschmutzungen (vorgesehene Leitfähigkeit 2 μS), Nebenkreisläufe zur Regelung des Moderatorspiegels und zum Fluten des Deckelzwischenraumes bei Brennelemententladung, Meßkreisläufe zur Verseuchungs- und Hülsenkontrolle. Es werden nur absolut dichte Pumpen (mit „Spaltrohrantrieb") und Ventile (mit „Balgdichtung") verwendet. Die Edelstahlwärmeaustauscher haben Doppelböden zur Vermeidung von H_2O- und D_2O-Durchmischung bei Schweißfehlern.

b) Sekundärer (H_2O-)Kühlkreis. Er besteht aus Hauptkreislauf zwischen Wärmetauschern und Kühlturm, Reinigungskreislauf mit Filtern und Ionenaustauschern, Hilfskühlkreisen für thermischen Schirm, Reaktordeckel, Prüfkreisläufe, Absetzblock und Absetzbecken, Experimentierkanäle, Motorkühlung usw., Notkühlung aus Hochbehälter.

c) Schutzgas-(He-)Kreislauf zur Entfernung von Knallgas und Fremdgasen aus den Deckelzwischenräumen. D_2O-Rekombination in einem Katalysator, Fremdgasabsorption an glühenden Titanspänen und im Tiefkühlkohlebett (bei der Temperatur der flüssigen Luft).

d) Luftkreisläufe zur Kühlung, Spülung und Klimatisierung.

9. Neutronenfluß und Wärmebelastung:
mittlerer thermischer Fluß im Uran
$7{,}5 \cdot 10^{12}$ Neutr./cm² s,
mittlerer thermischer Fluß im Moderator
$1{,}2 \cdot 10^{13}$ Neutr./cm² s,
maximaler thermischer Fluß im Moderator
$3 \cdot 10^{13}$ Neutr./cm² s,
maximaler schneller Fluß $1 \cdot 10^{13}$ Neutr./cm² s,
Wärmeleistung 12 MW,
maximale Oberflächenbelastung des Brennstoffstabs
90 W/cm²,
maximale Oberflächentemperatur des Brennstoffstabs
80 °C,
Eintrittstemperatur des Kühlwassers etwa 36 °C,
Austrittstemperatur des Kühlwassers etwa 45 °C.

10. Reaktivität:

a) Elementarzelle:

k_∞ = 1,22 (Multiplikationsfaktor)
η = 1,32 (Ausbeute im Uran)
ε = 1,035 (Schnelle Spaltung)
f = 0,969 (Thermische Nutzung)
p = 0,924 (Bremsnutzung)

b) Gesamtreaktor:

P_s = 0,948 (Ausflußfaktor für schnelle Neutr.)
P_l = 0,943 (Ausflußfaktor für langsame Neutr.)
Γ = $-2{,}2 \cdot 10^{-4}$ $(°C)^{-1}$ (Temperaturkoeffizient der Reaktivität)

c) Reaktivitätsbilanz:

Reaktivitätsüberschuß ideal $(k_\infty - 1)$:	22 %
Ausfluß ohne Zentralkanal $\triangle k_\infty$:	−10 %
Ausfluß mit Zentralkanal (13 cm ⌀):	−11,5 %
Minimalverlust in festen Einbauten (ohne Zentralkanal) $\triangle k_{geo}$:	−4,0 %
Samariumvergiftung $\triangle \varrho$:	−0,9 %
Xenonvergiftung $\triangle \varrho$:	−2,1 %
Temperatureffekt $\triangle \varrho$:	−0,6 %
Überschußreaktivität maximal $(k_{eff} - 1)$: (kalter Reaktor, ohne Zentralkanal)	+9,6 %

Überschußreaktivität minimal ($k_{eff} - 1$): $+3{,}4\,\%$ (bei Vollast, mit Zentralkanal)

FR 2 (Forschungsreaktor 2)

Steuerhub 16 Trimmabschaltstäbe ($k_{eff,\,Ende} - k_{eff,\,Anf.})/k_{eff,\,Anf.}$: $-10{,}4\,\%$

Abschalthub maximal $k_{eff} - 1$: $-10{,}4\,\%$

Abschalthub minimal ($k_{eff} - 1$): $-1{,}8\,\%$

Regelhub maximal $\triangle k_{eff}$: $0{,}5\,\%$

11. Regelung:

a) Neutronenflußregelung im Dauerbetrieb, mit linearem Meßkanal: *Sollwertbereich $10^{-2} - 1$ mal Vollast, Regelgenauigkeit ca. $\pm 0{,}3\,\%$ Vollast, nichtlinearer PI-Schrittregeler.

b) Neutronenflußregelung beim normalen Start, mit logarithmischem Meßkanal: Sollwertbereich $10^{-7} - 1$ mal Vollast, Regelgenauigkeit ca. $\pm\, 5\%$ des Sollwerts, nichtlinearer PI-Schrittregeler mit zunächst zunehmender und bei großen Regelabweichungen wieder abnehmender Integral- und Proportionalverstärkung.

Bei Überschreitung des Stellbereichs erfolgt jeweils automatische Auslösung der Trimmnachfolgesteuerung. Versagen des Regelstabes führt über Drehmomentschalter zur Umschaltung der Regelung auf das Trimmsystem.

c) Weitere Regelungen: Einstellung eines vorgegebenen *Moderatorspiegels, des Unterdrucks im Heliumkreislauf und in den Luftkreisläufen des Reaktorblocks, Aufrechterhaltung des vorgeschriebenen Luftdrucks in der Reaktorhalle.

12. Sicherungseinrichtungen:

a) Konstruktive Maßnahmen:

Gegen zu schnelle Leistungssteigerungen: Geschwindigkeitsbegrenzung beim Trimmen, Einfüllen des Moderators (maximal 0,2 cm/s), Umladen von Isotopeneinsätzen, Experimentiereinbauten u. dgl.

Gegen zu hohe Temperaturen: Sicherung der Kühlung durch Reservepumpen, Notkühlkreisläufe, Notstromaggregate, Hochbehälternotkühlung über Ansaugrohre für die Hülsenkontrolle.

Gegen Korrosionsschäden: Vollentsalzung mit Filtern und Ionenaustauschern in beiden Kühlkreisläufen, ausschließliche Verwendung von Edelstahl und Aluminium im Primärkreislauf.

FR 2 (Forschungsreaktor 2)

Gegen Verseuchungen: Serienschaltung von Primär- und Sekundärkreisläufen, Unterdruck im Reaktorblock, Absetzblock und gesamten Gebäuden, gas- und wasserdichte Bauweise, hoher Schornstein.

b) Kontrollmaßnahmen (Sicherungssystem):

Vervielfachung wichtiger Signale durch Parallelmessung sowie Parallelschaltungen bei den wichtigsten Steuer- und Schaltorganen.

Einsatz von *2-von-3-Systemen für den Schnellschluß und evtl. Folge-Steuerungen bei folgenden Messungen: Neutronenfluß (logarithmisch und linear), zugehörige zeitliche Ableitungen, Kühlwassertemperatur, Förderdruck der D_2O-Pumpen, Knallgasgehalt im Helium, Abluftaktivität am Schornstein, Strahlungsdosis im Gebäude, bestimmte Störungen von Experimenten.

Dauerüberwachung von Temperatur und Kühlung aller Brennstoffelemente und Isotopenkanäle mit Alarm und Schnellschlußauslösung.

Automatische Hülsenüberwachung aller Brennstoffelemente in ca. 25minütigem Takt.

Aktivitätskontrolle der Ablaufleitungen aller Kreisläufe aus dem Gebäude.

Fernsteuerungen aller wichtigen Stellglieder und automatische Folgesteuerungen bei Ausfällen.

13. Steuerstäbe zur Reaktivitätssteuerung:

a) Insgesamt 16 kombinierte Trimmabschaltstäbe auf Zwischengitterplätzen. Zusammenfassung zu ein oder zwei parallel bewegten Gruppen. Geschwindigkeit des Einzelstabs beim Trimmen maximal 0,1 cm/s, Gesamthub 210 cm, $\Delta k = 0{,}128$ für alle 16 Stäbe zusammen, entsprechend $\mathrm{d}k/\mathrm{d}t \leqq 1 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{s}^{-1}$. Abschaltzeit für die ersten -2 Prozent von k maximal 0,3 s, insgesamt maximal 0,6 s.

Der Absorberteil ist ein beiderseits mit Aluminium verkleidetes Cd-Rohr (0,1 cm dick, 6 cm $\varnothing$) in Al-Führungsrohren (7 cm $\varnothing$) gleitend, mit Magnetkupplung zum Trimmantrieb und hydraulischem Stoßdämpfer. Trimmantrieb: Kugelspindel-Muttergetriebe (Spindel drehend) und Synchronmotorantrieb. Induktive Haftmeldung, pneumatische Abfallmeldung.

b) Regelstab: Absorberteil, Führungsrohr und äußere Maße wie bei a), jedoch ohne Magnetkupplung und

Stoßdämpfer. Antrieb mit Kugelspindel (Mutter drehend). Geschwindigkeit 6 cm s^{-1}, entsprechend $dk/dt = 2{,}5 \cdot 10^{-4}\,s^{-1}$, Hub 120 cm, entsprechend $\Delta k = 5 \cdot 10^{-3}$. Einstellgenauigkeit ca. 0,1 cm, entsprechend $\Delta k = 5 \cdot 10^{-5}$.

14. Verwendungszweck.

Erzeugung von großen Neutronenmengen (2 g pro Jahr) für Kernforschungen, Materialprüfungen an neuen Reaktorbauteilen und Isotopenerzeugung; Gewinnung von Plutonium (ca. 3 kg pro Jahr) und U 233 (aus Thorium); Untersuchung chemischer, biologischer und medizinischer Strahlenwirkungen; Sammlung von Erfahrungen im Bau und Betrieb von größeren Reaktoren und Schulung des Nachwuchses. [9]

Fraktionierkolonne, eine Kolonne, die mit vielen Böden (in der Praxis meist Füllungen von Glaskugeln, Stahlspiralen) ausgestattet ist, um die Trennwirkung zu erhöhen, s. Destillation. [18]

engl.: rectification column

franz.: tour de fractionnement

Fraktionierung. Die sog. fraktionierte Bestrahlung menschlichen Gewebes mit Röntgen-Strahlen bedeutet eine Unterteilung der zu einer geplanten Reaktion notwendigen Gesamtdosis in mehrere Einzeldosen. Es soll damit erreicht werden, daß zur Erzielung der geplanten Reaktion größere Dosen gegeben werden können als bei der Einzeitbestrahlung, ohne daß deshalb eine stärkere Reaktion der Haut eintritt.

Die Erholungsfähigkeit des kranken Gewebes, auf das die Bestrahlung hinzielt, ist im allgemeinen geringer als beim gesunden. Die F. läßt eine Steigerung der biologischen Erholungsfähigkeit des Gewebes zu, ohne daß die Dosis vermindert werden muß. [28]

engl.: (dose) fractionation

franz.: fractionnement de la dose

Francium (Fr), schwerstes Alkalielement der Ordnungszahl 87. Alle Isotope sind instabil. Das erste Fr-Isotop $^{223}_{87}Fr$ wurde 1939 von M. Perey als Glied der Actinium-Zerfallsreihe gefunden. Das Element wurde zu Ehren des Heimatlandes der Entdeckerin „Frankreich" so benannt. Einige Fr-Isotope konnten künstlich hergestellt werden. $^{223}_{87}Fr$ besitzt mit 22 Minuten die

längste Halbwertszeit. Als Träger-Ionen kommen für Fr nur Cs und Rb in Frage, da die anderen Alkalielemente in ihren Ionenradien zu stark differieren. [3]
engl.: francium *franz.: francium*

Frankfurter Forschungsreaktor, s. FRF.

FRB (Forschungsreaktor Berlin) ist ein thermischer, homogener, leichtwassergekühlter und moderierter Lösungsreaktor mit 20 % angereichertem Uran als Spaltstoff. Er entspricht in seinem Aufbau dem FRF, d. i. Typ L-54 der Atomics International, Canoga Park, USA (siehe FRF). [7]

Lit.: Die Atomwirtschaft, Bd. II, Heft 7/8, S. 232, 1957.

FRED (Fast Reactor Experiment Dounreay) ist ein Leistungs-Brüter-Experiment im technischen Großmaßstab, mit dessen Hilfe vor allem die Ökonomie von schnellen Reaktoren in Kraftwerksanlagen untersucht werden soll (Abb. 1). Außerdem soll die Technologie

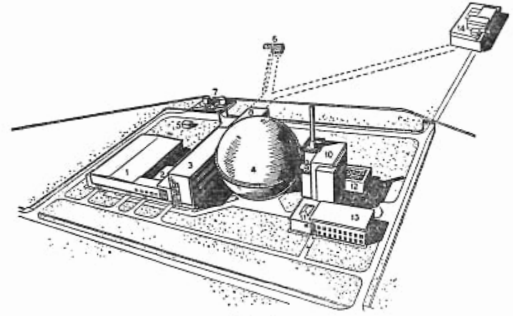


Abb. 1

1 Diesel-Generatoren
2 Verbindungsbau
3 Wärmetauscher
4 Sicherheitsbehälter
5 Transformatorenstation
6 Abfallkanal
7 Dieseltreibstofflager
8 Turbinenhalle
9 Luftschleuse
10 Lager für Spaltstoffelemente
11 Kontrollwarte
12 Lagerung gebrauchter Spaltstoffelemente
13 Verwaltungsgebäude
14 Seewasser Pumpenhaus

der Brennstoffe für schnelle Reaktoren, insbesondere die des Plutoniums, geklärt werden. Der schnelle Reaktor ZEUS war als kritisches Experiment für FRED gedacht. Wie die S p a l t z o n e des ZEUS ist auch die des FRED ein hexagonales Prisma von 53 cm Durchmesser, das rund 350 Spaltstoffelemente enthält. Die

Elemente sind Rohre von 1,9 cm Außendurchmesser
und besitzen gerippte Schutzhülsen aus Niobium. In

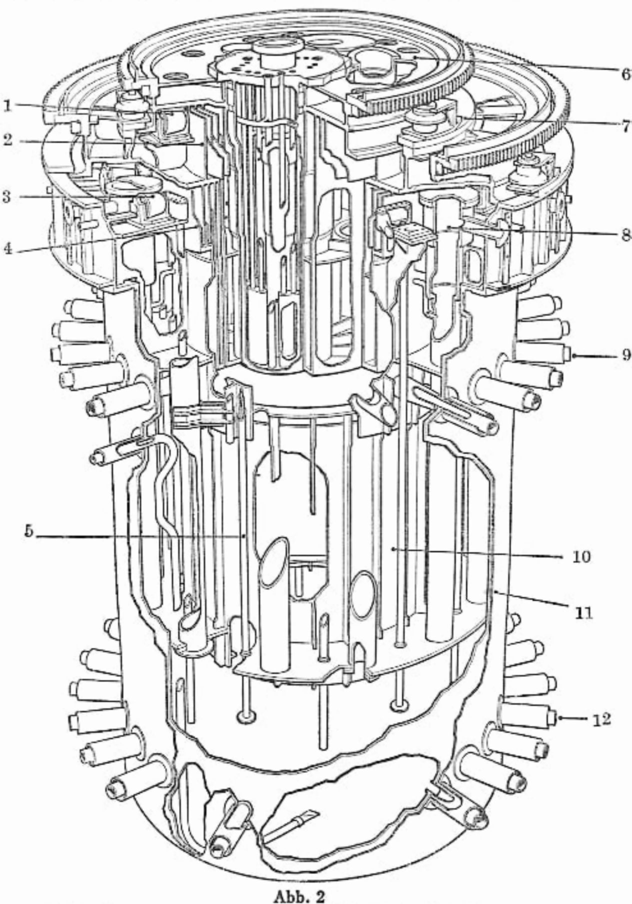


Abb. 2

1 Rollenlager
2 Flüssigkeitsdichtung
3 Rollenlager
4 Flüssigkeitsdichtung
5 Rohre für Meßinstrumente
6 innerer Abschirmdeckel
7 äußerer Abschirmdeckel
8 Rohre für Kontrollmechanismus
9 Kühlmitteleinlaß
10 inneres Gefäß
11 doppelwandiger Kessel
12 Kühlmittelaustritt

FRED der Spaltzone wird zunächst rund 1 t auf etwa 40 % angereichertes Uran eingesetzt, ab 1963 ist der Übergang auf Plutonium vorgesehen. Die Brutzone besteht aus 1900 Stäben, die 65 t Natururan in Stahlhülsen enthalten.

Die Regelung erfolgt durch Bewegen von 12 Stabgruppen. Außerdem sind drei Sicherheitsstäbe mit ^{10}B vorhanden.

Der Reaktortank ist ein kompliziertes Gefäß aus nichtrostendem Stahl und wiegt bei einer Höhe von 6 m und einem Durchmesser von 4 m über 45 t (Abb. 2). Das innere Gefäß des Tanks nimmt die Spaltzone und den Brutmantel auf. Der Reaktortank ist oben durch zwei exzentrische, drehbare Deckel geschlossen, die durch eine kleine Öffnung den Zugang zu jedem der Stäbe ermöglichen. Durch diese Öffnung arbeitet der Greifer der Lademaschine, die auf den Tankdeckel aufgesetzt werden kann.

Der Reaktortank ist von einem Neutronenschild (1,2 m Graphit) umgeben. Tank und primäre Wärmetauscher befinden sich in einer Betonwanne von 24 m Durchmesser, deren 1,5 m starke Wände als biologischer Schild fungieren. Der Reaktor ist von einem kugelförmigen Sicherheitsbehälter von 45 m Durchmesser umgeben, der im Havariefall die radioaktiven Gase aufnehmen kann und auch ein Natrium-Feuer zu lokalisieren vermag.

FRED wurde für eine Wärmeleistung von 60 MW ausgelegt, die zu 80 % in der Spaltzone und

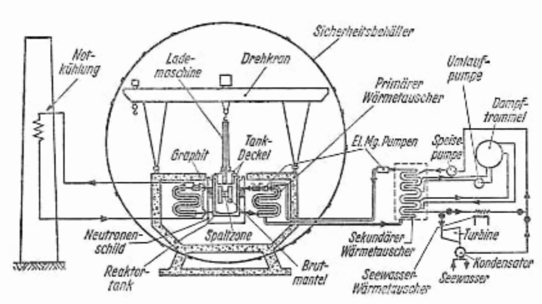


Abb. 3

20 % im Brutmantel erzeugt wird. Durch Schnellspaltung im U^{238} kommen 20 % der Wärmeleistung zustande. Die Kühlung erfolgt durch einen Primär- und Sekundärkreislauf mit einer Na-K-Legierung (70/30). Das Kühlmittel durchströmt den Reaktortank von oben nach unten, wobei es mit einer Temperatur von 200 °C eintritt und den Tank mit 350 °C verläßt. Die 24 primären Wärmetauscher bestehen aus konzentrischen, rostfreien Stahlrohren. Die Umwälzung von 37 800 l Kühlmittel pro min wird durch elektromagnetische Flachrohrpumpen bewirkt. Die sekundären Wärmetauscher übertragen die Wärme auf Wasser als tertiäres Kühlmittel, wobei Dampf von 270 °C bei 10 at erzeugt wird. Der Dampf kann entweder Turbinen treiben, oder aber seine Wärme in speziellen Wärmetauschern an Seewasser abgeben. Im Havariefall arbeitet eine Notkühlanlage nach dem Termosyphon-Prinzip (Abb. 3). S. a. Reaktortabelle. [13]

Lit.: Nuclear Engineering, June 1957.

Frenkel-Defekt. Fehlstelle in einem Kristallgitter, die entsteht, wenn ein Gitterbaustein (Atom, Ion, Molekül) durch die Energie der Wärmebewegung oder durch äußere Einwirkung (Strahlung) unter Bildung einer Leerstelle von seinem normalen Gitterplatz auf einen *Zwischengitterplatz verlagert wird. [4]

engl.: Frenkel defect *franz.: défaut de Frenkel*

Lit.: W. Finkelnburg, Einf. in die Atomphysik, 3. Aufl., Springer, Berlin, 1954.

Frequenzgang, frequenzabhängiger komplexer *Übertragungsfaktor zwischen den harmonischen Schwingungen der Eingangs- und Ausgangsgröße eines beliebigen linearen Übertragers. Der F. ist wegen der mathematischen Ähnlichkeit zwischen Fourier- und Laplacetransformation praktisch identisch mit der durch die letztere definierten *Übertragungsfunktion. In beiden Fällen gestattet die Theorie auch ohne Rücktransformation tatsächlicher Eingangsverläufe wesentliche Schlüsse auf den tatsächlichen Verlauf der Ausgangsgröße (z. B. ob Schwingungen im Übertrager angeregt oder gedämpft werden u. dgl.).

Der F. kann entweder aus den bekannten Differentialgleichungen des Übertragers berechnet oder durch

experimentelle Untersuchungen ermittelt werden, so daß mit seiner Hilfe auch solche Regelsysteme halbtheoretisch beurteilt werden können, für die die Differentialgleichungen selbst nicht bekannt sind. Die Anwendung in der Regeltheorie wird außerdem durch einige allgemeingültige Regeln für den Zusammenhang zwischen der Amplituden- und der Phasenabhängigkeit von der Frequenz sehr erleichtert. So tritt bei vielen Übertragern mit annähernd gleichmäßiger Amplitudenabnahme proportional $\omega^{-\nu}$ eine Phasenverzögerung $(-\pi/2)^{\nu}$ ein. Der Einfluß der Amplitudenabnahme auf die Phasendrehung erstreckt sich dabei jeweils etwa über einen Faktor 10 beiderseits der betreffenden Frequenz.

Mit dieser Regel lassen sich häufig die Amplituden- und Phasenverläufe auch größerer Regelkreis verhältnismäßig einfach ohne explizite mathematische Berechnung auch dann ermitteln, wenn die Frequenzen für die einzelnen Teilglieder nur als Amplitudenverläufe bekannt sind. Ein einzelner Regelkreis ist daher im allgemeinen nur dann ausreichend stabil, wenn die Amplitudenabnahme innerhalb eines Frequenzbereiches von der Größenordnung 1 : 10 beiderseits der zur Amplitudenverstärkung 1 gehörenden Frequenz höchstens mit der Potenz $\nu \leq 1{,}5$ abnimmt.

Typische F. sind:

a) Proportionalglied: $F = K$,

b) Integrator: $F = \dfrac{K}{j\,\omega}$,

c) Differentiator: $F = K \cdot j\,\omega$,

d) Verzögerungsglied n-ter Ordnung:

$$F = \frac{K}{(1 + j\,\omega\,T)^n},$$

e) PI-Regler: $F = K \cdot \dfrac{1 + j\,\omega\,T}{j\,\omega\,T}$,

f) PID-Regler: $F = K\,\dfrac{1 + j\,\omega\,T_1(1 + j\,\omega\,T_2)}{j\,\omega\,T_1}$.

Beim Reaktor interessiert besonders der F. zwischen dem Neutronenfluß als Ausgangsgröße und den Re-

aktivitäts- oder Kühlungsschwankungen als Eingangsgröße. Zur Berechnung des reinen Neutronen-F.s ohne Berücksichtigung der stabilisierenden inneren und äußeren Gegeneffekte (*Temperatureffekt, *Vergiftung) werden in den kinetischen Neutronengleichungen des Reaktors (s. Reaktor-Kinetik) nur kleine Amplituden in $\Delta\Phi$, ΔC_i, Δ_k um die jeweiligen konstanten Mittelwerte Φ_0, $(C_i)_0$, $k_0 \approx 1$ mit überall gleicher Frequenz angesetzt. Mit den bekannten Abkürzungen β, β_i, λ_i, l ergibt sich dann für den F.:

$$F(j\,\omega) = \frac{\Delta\Phi(j\,\omega)}{\Delta k(j\,\omega)} =$$

$$= \Phi_0 \frac{1 - \beta + \sum_{i=1}^{6} \frac{\beta_i \lambda_i}{\lambda_i + j\,\omega}}{1 - (1-\beta) k_0 + j\,\omega\, l - k_0 \sum_{i=1}^{6} \frac{\beta_i \lambda_i}{\lambda_i + j\,\omega}}. \tag{1}$$

Genauere Kurvenverläufe sind veröffentlicht. In erster Näherung läßt sich der Verlauf von (1) durch einen einfachen PI-Verlauf gemäß

$$F(j\,\omega) = \Phi_0 \cdot K \frac{1 + j\,\omega\, T_1}{j\,\omega\, T_1 (1 + j\,\omega\, T_2)} \tag{2}$$

mit $K \approx 150$; $T_1 \approx 20$ s; $T_2 \approx 0{,}2$ s (für $l \approx 10^{-3}$ s) ersetzen. Wie man sieht, ist der Reaktor als ein *Integrator aufzufassen, dessen Verstärkung bei niedrigeren Frequenzen (ab 1 Hz) allmählich (bis 10^{-2} Hz) bis auf den 10^{-2}-Teil herabgesetzt wird.

Da die Phasenverzögerung dementsprechend im gleichen Frequenzbereich von $-90°$ bei höheren und niedrigeren Frequenzen auf nur etwa $-30°$ zurückgedreht wird, ergibt sich auch ohne weitere Stabilisierungen mit einem reinen I-Regler eine ausreichend *gedämpfte Regelung, wenn die *Grenzfrequenz der Regelung (bei der Amplitudenverstärkung 1) in die Mitte des Bereiches gelegt wird (bei ca. 0,1 Hz). Bei 10mal größeren oder kleineren Grenzfrequenzen sind dagegen schon keine reinen I-Regler mehr brauchbar.

Wegen der Abhängigkeit der Kreisverstärkung vom

stationären Neutronenflußmittelwert und wegen der entsprechend schwankenden Grenzfrequenz der Regelung empfiehlt sich ein PI-Regler also immer dann, wenn der Sollwert über einen größeren Bereich verstellt werden soll. Die Nachlaufzeit dieses Reglers sollte bei etwa 10^2 s liegen, damit die zusätzliche Phasenrückdrehung günstig an das Phasenminimum des Reaktorfrequenzganges anschließt.

Wesentliche Veränderungen des bisher besprochenen F.s ergeben sich bei Leistungen, die so hoch sind, daß eine merkliche Gegenkopplung durch Temperatureffekte und Vergiftungen hinzukommt. Damit ist zumeist eine Verbesserung der Regeleigenschaften verbunden, wenn für die verschiedenen Temperatureffekte eine reine Parallelschaltung ohne inneren Wärmeaustausch untereinander angenommen werden kann. In diesem Fall wird der Integratorcharakter des Reaktors von der Frequenz ab, bei der die Gegenwirkung einsetzt, ausgeschaltet und durch den eines Proportionalgliedes mit einer Verstärkung $K = (\Phi_0/\varrho_{T_0})$ (mit ϱ_{T_0} Temperatureffekt bei Φ_0) ersetzt. Besondere Verbesserungen des einfachen I-Reglers sind dann im allgemeinen nicht mehr erforderlich.

Ernsthafte Schwierigkeiten treten dagegen auf, wenn die inneren Rückführungen durch die Temperatureffekte als Hintereinanderschaltungen mehrerer etwa gleich langsamer Verzögerungsglieder aufgefaßt werden müssen, da dann so viele Integratoren im inneren Regelkreis hintereinander liegen, daß unter Umständen sogar selbständige temperaturbedingte Schwingungen entstehen können, wenigstens aber sehr starke Phasenverschiebungen auftreten. Eine generelle Beurteilung dieser Fälle ist wegen der großen Unterschiede zwischen den Verzögerungszeitkonstanten und der Größe der Temperatureffekte kaum möglich. [9]

engl.: transfer function *franz.: fonction de transfert*

Lit.: s. Regelung u. Abschalten.

Frequenzkodesystem. Signalübertragung, bei der verschiedenen Zuständen bestimmte Frequenzen zugeordnet sind. [6]

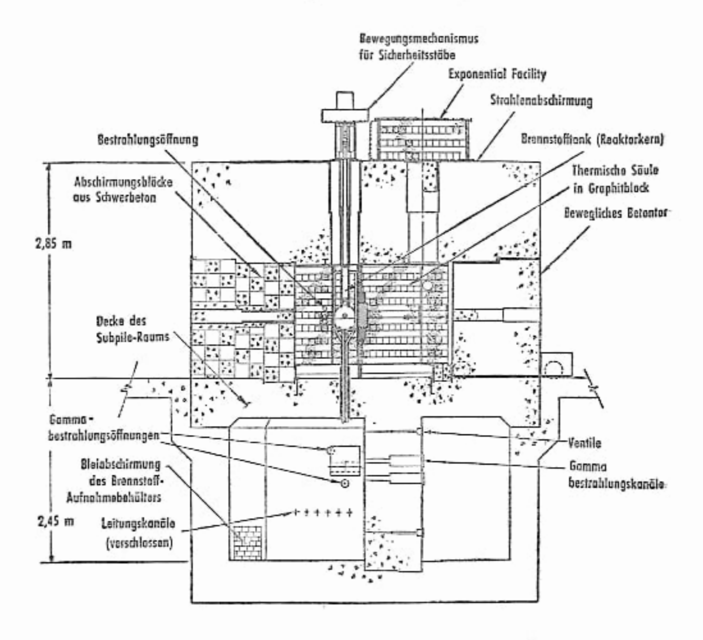
engl.: frequency code system

franz.: système à code de fréquences

Frequenzmodulation, s. Modulation.
engl.: frequency modulation
franz.: modulation de fréquence

Fressen. Lokale Verschweißung zweier metallischer Oberflächen, welche sich reibend gegeneinander bewegen (z. B. Welle und Gleitlager). Dabei werden Teilchen aus einer oder aus beiden Oberflächen herausgerissen. [4]
engl.: galling *franz.: grippage*

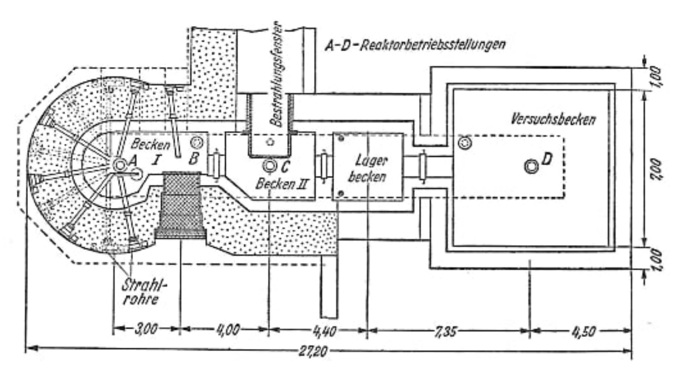
FRF (Forschungsreaktor Frankfurt) entspricht dem Typ L-54 der Atomics Internationel, Canoga Park, Cal., USA. Derselbe Reaktortyp wird auch in Berlin aufgestellt. Außerhalb der USA befindet sich ein L-54 in Japan, der Ende August 1957 kritisch wurde. FRF ist ein thermischer, leichtwassermoderierter und -gekühlter, homogener Reaktor mit 20 % angereichertem Uranylsulfat in Wasser gelöst als Spaltstoff. Einen Schnitt durch den Reaktor zeigt die Abb. Die Spaltzone



FRF ist in einer Stahlkugel von 32 cm innerem Durchmesser, die außer der Spaltstofflösung ein Kühlsystem enthält. Sie wird von den Führungshülsen der vier Borkarbidkontrollstäbe vertikal, vom großen zentralen Experimentierkanal horizontal durchsetzt. Die Lösungskonzentration beträgt etwa 400 g Uran pro Liter, die insgesamt eingesetzte Menge etwa 1,6 kg U-235, kritische Menge 1,17 kg U-235. Bei einem mittleren thermischen Neutronenfluß von 10^{12} n/cm^2 s im Kern entwickelt der Reaktor eine Wärmeleistung von 50 kW (bei einer Lösungstemperatur von 80 °C), die von einem geschlossenen primären Kühlwasserkreislauf (Durchflußmenge 50 l/min, Eintrittstemperatur 22 °C, Austrittstemperatur 36 °C) abgeführt wird. Der Primärkreislauf gibt seine Wärme an einen ebenfalls geschlossenen Sekundärkreislauf ab, der seinerseits von einem Kühlaggregat gekühlt wird. Auf die Reaktorkugel ist ein Steigrohr mit Überlaufbehälter aufgesetzt, in den im Falle einer Eruption (Überkochen oder Aufwallen infolge einer plötzlichen Gasblasenbildung) die Reaktorlösung überlaufen soll, der Rücklauf in den Kern wird durch kleine Öffnungen verzögert. Das Steigrohr dient gleichermaßen als Spülgaskammer. Darin wird das aus dem Kern aufsteigende, durch Radiolyse entstehende Knallgas sicherheitshalber mit einem Spülgas vermischt, abgezogen, und in einem Rekombinationsgefäß im Reaktorkeller katalytisch verbrannt. Das Reaktorgefäß mit seinen Zusatzeinrichtungen ist in einem weiteren druckfesten zylindrischen Aluminiumbehälter untergebracht, der in erster Linie einen Lösungsverlust bei evtl. Durchkorrodieren des Stahlgefäßes verhindern soll. Das ganze ist vom Graphitreflektor umgeben. Diese Anordnung ist ein Quader von 2,4 m Länge, 1,5 m Breite und 1,5 m Höhe, zusammengesetzt aus Graphitprismen ($10 \times 10 \times 130$ cm). Dieser Block ruht in einem weiteren Al-Behälter. Den Abschluß nach außen bildet eine 1,5 m starke Betonschicht als äußere Abschirmung. Der FRF wird durch vier Borkarbidstäbe gesteuert, die gleichzeitig auch als Sicherheitsstäbe verwendet werden. Drei davon sind als Trimmstäbe gedacht und nur manuell verstellbar. Der vierte dient als Feinregler und

kann manuell oder automatisch bewegt werden. Der hohe negative Temperaturkoeffizient der Lösung sowie deren starke Dichteänderung bei Gasbildung und evtl. Verdampfung infolge plötzlichen Auflaufens des Neutronenspiegels stellen einen großen Sicherheitsfaktor dar. Der Reaktor besitzt 13 horizontale und fünf vertikale Experimentierkanäle, die mehr oder weniger tief in den Reflektor eingeführt sind. Dazu kommen zwei thermische Säulen. S. a. Reaktortabelle. [7]
Lit.: Atomwirtschaft 2, Heft 7/8, 1957, S. 217.

FRH (Forschungsreaktor Hamburg) ist ein *Wasserbeckenreaktor, thermisch, heterogen, leichtwasser gekühlt und moderiert, mit 20 % angereichertes Uran als Brennstoff. Der Entwurf stammt von der amerikanischen Babcock & Wilcox Comp., New York, USA, und ist ähnlich dem von dieser Firma für die Universität Michigan, USA, gebauten Reaktor. Die Abb. zeigt den Grundriß des Reaktors. Das Wasserbecken, rund 9 m tief, ist viergeteilt. Die einzelnen Zellen sind durch Al-Tore voneinander getrennt. Drei dienen als Versuchsbecken, eine als Lagerbecken. Der Schwerpunkt des Urangitters ist 1,5 m über dem Beckenboden. Das Gitter besteht aus 25 bis 35 Brennstoffelementen vom MTR-Typ zu je 19 Spaltstoffplatten (Sandwich) mit insgesamt 4,4 kg U-235, kritische Menge 3,85 kg. Nicht besetzte Elementplätze im Kern werden u. U. mit Reflektorelementen (Al-Behälter mit



Graphit) beschickt. Der Reaktor wird mit einem Regelstab und drei Sicherheitsstäben gesteuert. Das Wasser des Beckens kühlt, moderiert, reflektiert und schirmt ab. Der thermische Neutronenfluß beträgt bei einer Maximalleistung des Reaktors von 5 MW Wärmeleistung im Mittel $2 \cdot 10^{13}$ n/cm² s. Die Wärme wird durch Zwangsumlauf des Wassers über einen Wärmetauscher abgeführt. Austrittstemperatur aus dem Bekken 46 °C, Eintrittstemperatur 38 °C. Der FRH hat 13 Experimentierkanäle, dazu eine thermische Säule und ein 170×200 cm² großes Austrittsfenster für Bestrahlungsversuche mit schnellen Neutronen. – Der Reaktor ist nahe der Ortschaft Tesperhude bei Geesthacht an der Elbe in einer ehemaligen Munitionsfabrik untergebracht. S. a. Reaktortabelle. [7]
Lit.: Die Atomwirtschaft 2, 233, 1957.

Fricke-Dosimeter, chemisches Dosimeter, das zuerst von Fricke beschrieben wurde. In wäßriger, schwefelsaurer Lösung wird Fe^{2+} durch ionisierende Strahlung zu Fe^{3+} oxydiert. Wesentlich dabei ist die Reaktion der Zersetzungsprodukte des Wassers mit dem zweiwertigen Eisen.

$$H + O_2 \rightarrow HO_2$$
$$HO_2 + Fe^{2+} + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + H_2O_2$$
$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + HO^- + OH$$
$$Fe^{2+} + OH \rightarrow Fe^{3+} + OH^-$$

Die Energieabsorption dieses Systems hat weitgehende Ähnlichkeit mit der Absorption energiereicher Strahlung im lebenden Gewebe. Die Reaktion ist abhängig von der Ionisationsdichte der Strahlung, aber in bestimmten Bereichen unabhängig von der Konzentration des Eisens. [18]
engl.: Fricke dosimeter
franz.: dosimètre de Fricke

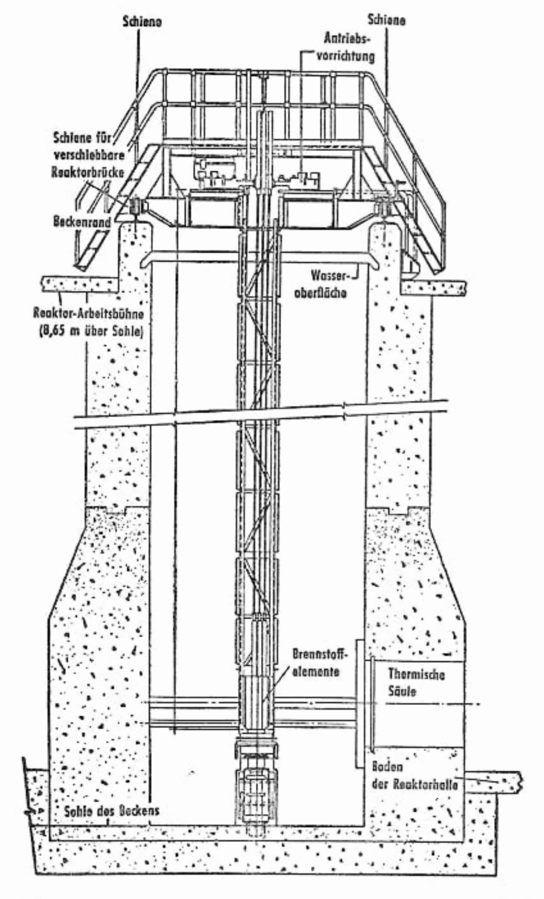
Friedhof, radioaktiver, s. Abfallagerung.

Fritzscheid. Rötlichbrauner Uranglimmer mit ca. 60 % UO_3-Gehalt (Autunit mit Mangan an Stelle von Kalzium). [24]
franz.: fritzschéite

FRM (Forschungsreaktor München) ist ein thermischer, heterogener, leichtwassermoderierter und -ge-

kühlter Reaktor vom Typ der Wasserbeckenreaktoren mit 20 % angereichertem Uran als Spaltstoff. Der FRM wurde von der AMF Atomics, New York, USA, entworfen, er ähnelt dem ersten von dieser Firma für das Batelle Memorial Institute, West Jefferson, Ohio, USA, erstellten Reaktor. Die Abb. zeigt den grundsätzlichen Aufbau, ein zweigeteiltes, betoniertes Wasserbecken

FRM



mit aufgesetzter Laufbrücke, an der an einem Aluminiumgestell befestigt, 7,7 m ins Wasser eintauchend, der Reaktorkern hängt. In einem Teil des Beckens, dem Betriebsteil, befindet sich der Reaktor während des normalen Betriebes, dort münden die etwa zehn Experimentierkanäle und die thermische Säule. Der andere Teil, durch ein bewegliches Al-Tor wasserdicht abzutrennen, nimmt den Reaktor für den Fall längerer Stillsetzung (Auswechseln von Brennstoffelementen, Reparatur im Betriebsbecken, Aufbau neuer Experimentiereinrichtungen im Becken usw.) auf. In ihm werden auch die abgebrannten Brennstoffelemente gelagert. Der Reaktorkern besteht aus 27 Brennstoffelementen vom MTR-Typ (s. Brennstoffelement) zu je zwölf Platten mit insgesamt 178 g U-235. Einige Elemente enthalten die Regel- und Steuerstäbe. Gesamtmenge U-235 4,28 kg, krit. Menge 3,58 kg. Bei einem thermischen Neutronenfluß von maximal $1{,}8 \cdot 10^{13}\ \mathrm{n/cm^2\,s}$ entwickelt der Reaktor eine Wärmeleistung von 1 MW, die vom Wasser des Beckens aufgenommen wird. Dies wird umgepumpt und gekühlt. Die maximale Temperatur beträgt 37 °C. Die Steuerung erfolgt im Normalbetrieb mit vier Borkarbidstäben und einem Stahlstab. Ein fünfter Borkarbidstab kann angebracht werden. Alle Stäbe sind vertikal beweglich. Außerhalb der Brennstoffanordnung wirkt das Wasser als Reflektor, und zusammen mit der Betonwand des Beckens als Abschirmung. S. a. Reaktortabelle. [7]

Lit.: Atomwirtschaft 2, Heft 7/8, 1957, S. 225.

Froude-Zahl (Fr.), s. Ähnlichkeitsgesetze der Wärmeübertragung.

engl.: Froude-No.

franz.: nombre de Froude

fruchtbar hat als Attribut von Reaktormaterialien die Bedeutung von *brütbar. Das Wort f. als wörtliche Übersetzung des englischen *fertile* ist hier ungebräuchlich. S. Brüter. [7]

Füllkörpersäule. Sie dient zur Durchführung von Gegenstromprozessen zum Stoff- und Wärmeaustausch, vorzugsweise zur *Rektifikation und zur *Solventextraktion. Im Gegensatz zur *Bodenkolonne ist sie

technisch einfach und billig. Dem steht als Nachteil gegenüber, daß der Druckverlust in der F. größer ist als in der Bodenkolonne und daß die rücklaufende, also herabströmende Flüssigkeit die Tendenz hat, nach außen, also zur Wand zu gehen („Randgängigkeit“) und damit den Austausch zu verschlechtern (starke Abweichung vom theoretischen Boden; s. Rektifikation). Die praktische Ausführung besteht darin, daß das Rohr

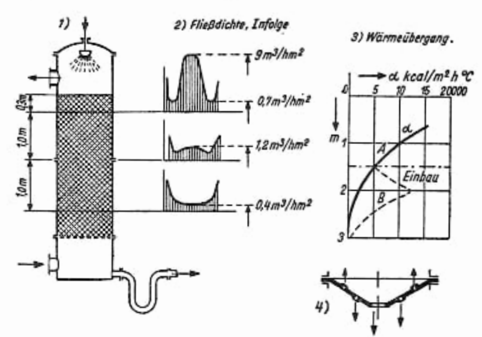


Abb. 1. Strömungsverteilung und Wärmeübergang in einer Füllkörpersäule

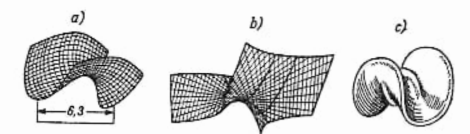


Abb. 2. Füllkörperformen (Berl-Sattel)

der Säule zwischen Blase und Kopf mit geeigneten (korrosionsbeständigen!) Körpern in loser Schüttung gefüllt wird: R a s c h i g - Ringe, B e r l - Sattelkörper, Intos-Ringe aus Glas, Porzellan, Metall und v. a. m. Es kommt darauf an, mit möglichst wenig Schütthöhe einen theoretischen Boden zu verwirklichen, ohne den Druckverlust zu hoch und die Randgängigkeit zu stark werden zu lassen. Eine weitere konstruktive Aufgabe besteht darin, den Rücklauf gut über den Querschnitt der Säule zu verteilen, z. B. mit brauseartigen Einrichtungen. Die Zahl der erzielbaren theoretischen Böden je Meter Säulenhöhe schwankt sehr stark je nach Ab-

messungen, Form der Füllkörper usw. zwischen etwa 4 und 50. [2]
engl.: packed column
franz.: colonne à (corps de) remplissage
Lit.: E. Kirschbaum, Destillier- und Rektifiziertechnik, 2. Aufl., Berlin, 1950. – Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik.

Funkenzähler. Zwischen zwei Elektroden, an die eine genügend hohe Spannung gelegt wird, kann durch Ionisation eine Funkenentladung ausgelöst werden. Sie wird üblicherweise durch elektrische Schaltmaßnahmen (Widerstand) gelöscht. Ionisationsvorgang kann der Durchgang eines ionisierenden Teilchens sein. Vorzüge des F.s: Robustheit, Möglichkeit der Herstellung sehr kleiner Volumina, bei flächenhaften Elektroden Lageanzeige des ionisierenden Teilchens durch Funkenort (Zählrohrteleskop). Beobachtung durch direkte Sicht, akustisch, Photozelle, Kamera, oder über elektrische Registriervorrichtung.
Vorzug: Sehr kleines empfindliches Volumen und sehr kleine Auflösungszeit. $T \leqq 10^{-10}$ s. [6]
engl.: spark counter
franz.: compteur à étincelles

Fusion, Zusammenlagerung von leichten Atomkernen zu schwereren, wobei Energie frei wird. Der Verlauf der Bindungsenergie in MeV, mit der ein einzelnes Nukleon im Atomkern festgehalten wird, ist in der

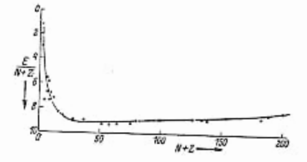


Abb. in Funktion der Massenzahl $A = N + Z$ (Neutronen- und Protonenzahl) aufgetragen. [7]
engl.: fusion
franz.: fusion

Fusionsprozesse. Als F. können alle *Kernumwandlungen bezeichnet werden, bei denen aus einem leichteren Ausgangskern ein schwererer Endkern entsteht. Meist versteht man jedoch darunter speziell die ener-

gieliefernden Prozesse beim Aufbau leichter Kerne aus Protonen und Neutronen, die im Laboratorium nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt werden können, aber zweifellos eine außerordentlich wichtige Rolle als Energiequelle der Sonne und anderer Fixsterne spielen.

Der energetisch ergiebigste dieser Prozesse ist der Aufbau eines Heliumkerns aus 4 Protonen:

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,e^{+},$$

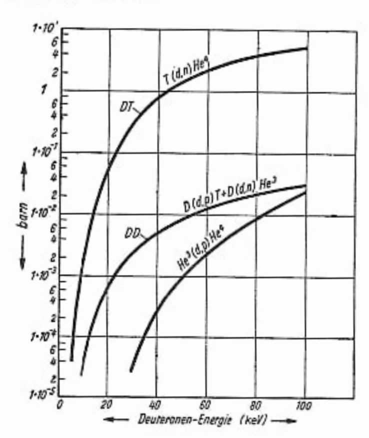
bei welchem zwei Positronen entstehen und außerdem je gebildetem Heliumkern eine Energie von 28 MeV frei wird, das sind für jedes Gramm „verbrannten" Wasserstoffs und gebildeten Heliums 180 000 kWh. Dieser Prozeß kann unter Sonnenbedingungen nicht direkt vor sich gehen, sondern nur in vier Stufen über den Kohlenstoffkern, der aber am Ende wieder in alter Form auftritt, also nur die Rolle eines Katalystors spielt. Der Wasserstoff-Helium-Prozeß ist die Hauptenergiequelle der Sonne. Die Elementarprozesse der Fusion und die freigesetzte Energie sind

$$\begin{array}{ll}
(1) & D + D \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + n + 3{,}25\ \mathrm{MeV} \\
(2) & D + D \rightarrow T + p + 4\ \mathrm{MeV} \\
(3) & T + D \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + n + 17{,}6\ \mathrm{MeV} \\
(4) & {}^{3}\mathrm{He} + D \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + p + 18{,}3\ \mathrm{MeV} \\
(5) & {}^{6}\mathrm{Li} + D \rightarrow 2\,{}^{4}\mathrm{He} + 22{,}4\ \mathrm{MeV} \\
(6) & {}^{7}\mathrm{Li} + p \rightarrow 2\,{}^{4}\mathrm{He} + 17{,}3\ \mathrm{MeV}
\end{array}$$

Von diesen können die D-D-Reaktionen wegen der relativ großen Häufigkeit des Deuteriums im Wasser am leichtesten Grundlage für einen technischen Prozeß sein. In 22 l Meerwasser ist 1 g Deuterium enthalten. Dessen Fusion nach (1) und (2) gibt ein Energieäquivalent von 10 t Kohle.

Die F. laufen wie alle Kernreaktionen unter bestimmten Wirkungsquerschnitten ab. Deren Verlauf in Funktion der Energie zeigt die Abb. Charakteristisch ist, daß die Reaktion erst oberhalb einer Minimalenergie einsetzt. Das ist analog zu chemischen Reaktionen, z. B. Verbrennung von Kohle zu Kohlendioxyd. Die Reaktionsquerschnitte sind klein gegen die Streuquerschnitte. Daher kann man praktisch keine Energie gewinnen, wenn man beschleunigte Teilchen, etwa aus

einer Hochspannungsanlage, auf einen entsprechenden Auffänger treffen läßt. Die Teilchen würden bei der Streuung Energie verlieren und bald unter der Reaktionsschwelle liegen. Daher müssen F. in technischem Ausmaß in einem hocherhitzten Plasma stattfinden, in dem a l l e Teilchen ausreichend große Energien haben. Das ist bei Temperaturen von 100 Millionen °K (10 keV) der Fall. S. Plasma, vollionisiertes. [1, 7]
engl.: fusion processes
franz.: procès de fusion



G

G-1. Bezeichnung für den ersten französischen Leistungsreaktor des *CEA in *Marcoule. In Betrieb seit 7. Januar 1956. Natürliches Uran als Brennstoff, Graphit als Moderator, luftgekühlt. Wärmeleistung: 40 000 kW, elektrische Leistung: 5000 kW, Kosten 9,5 Mrd. ffr. [24]

G-2 und G-3. Bezeichnung für zwei im Bau befindliche (für Fertigstellung 1957/58) französische Leistungsreaktoren des *CEA in *Marcoule, je 150 bis 200 MW Wärmeleistung und 30 MW elektrische Nutzleistung. Natürliches Uran als Brennstoff, Graphit als

Moderator, Kohlensäuregas als Kühlmittel. Druckbehälter aus Spannbeton. Vor allem zur Plutoniumerzeugung. [24]

Galenit ist ein Mineral der Zusammensetzung PbS (Bleiglanz). G. ist das wichtigste und meistverbreitete Bleierz. [26]

engl.: galena *franz.: galène*

Gallium 70 und 72, Isotope mit Bedeutung in der *Radiochemie und bei galliumhaltigen Metall-Legierungen. Sie werden durch Bestrahlung des dreiwertigen natürlichen Elements mit langsamen Neutronen gewonnen. Die Strahlung des ^{70}Ga (β: 1,65 MeV, γ: 1,04 u. 0,17 MeV) klingt bei einer Halbwertszeit von 21,4 Minuten sehr rasch ab, so daß bei radioaktiven Ga-Präparaten in der Regel nur ^{72}Ga (β: 0,64 bis 3,17 MeV, γ: 0,84 u. 0,60−3,35 MeV) vorliegt, das jedoch auch nur eine Halbwertszeit von 14,1 Stunden besitzt. Die spezifische Aktivität der beiden Isotope kann bis zu 32 Curie/g (Fluß langsamer Neutronen 10^{14} n/cm^2/s) gesteigert werden, was die kurzen Halbwertszeiten etwas ausgleicht. [16]

engl.: gallium *franz.: gallium*

Galvanisieren, s. Metallabscheidung, elektrolytische.

engl.: electrolytic plating

franz.: elektro-galvanisation

Gamma-Aufheizung. Die in einem Reaktor erzeugte γ-Strahlung wird nur zu einem Teil von dem Strukturmaterial der inneren Reaktoranordnung absorbiert. Etwa 5 % der gesamten in einem Reaktor freiwerdenden Wärme wird in Reflektor, Behälterwand und Schild durch Absorption von γ-Strahlung erzeugt. Bei Reaktoren mit hoher Leistung ist es daher oft nötig, Behälterwand und biologischen Schild durch einen „thermischen“ Schild vor der γ-Strahlung zu schützen und so den Aufbau von zu großen Wärmespannungen zu vermeiden. Zur Berechnung der durch die γ-Strahlung in Reflektor und Schild hervorgerufenen Wärmequellenverteilung ist es nötig, das Energiespektrum der Strahlung zu bestimmen und abzuschätzen, welcher Bruchteil der Strahlung den inneren Reaktoraufbau verläßt. Mit Hilfe von Absorptionskoeffizienten für das Reflektor- und Schildmaterial für verschiedene γ-

Energien ist es dann möglich, die Verteilung der Wärmequellen und daraus die Temperaturverteilung zu ermitteln. [5]

engl.: gamma-heating

franz.: chauffage gamma

Lit.: S. Glasstone, Principles of Nuclear Reaktor Engineering, van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1955. – Th. Rockwell, Reactor Shielding Design Manual, van Nostrand, Princeton. N. J., 1956.

Gamma-Eisen (Austenit). Die kubisch flächenzentrierte Modifikation des *Eisens, welche im Temperaturbereich zwischen 906° und 1401° besteht. Durch Legierungszusätze läßt sich dieser Temperaturbereich erweitern (z. B. durch C, Ni, Mn) oder einengen (z. B. durch Cr, V, Al, W, Mo, Si u. a.). Austenitische *Stähle sind Legierungen des Eisens mit Nickel, wobei das Gamma-Gebiet bis auf Raumtemperatur erweitert wird. [4]

engl.: austenite *franz.: austénite*

Gammameter = Meßgerät für Gammastrahlungsintensität. [6]

engl.: gamma-(radiation)meter

franz.: gammamètre

Gamma-N-Verhältnis. a) Physikalisch: Verhältnis zwischen dem Gammafluß und dem Neutronenfluß am gleichen Ort, b) meßtechnisch: Verhältnis zwischen den zugehörigen elektrischen Signalen eines dort befindlichen Neutronendetektors. Fall a) ist vorwiegend bei der Auslegung und Abschirmung physikalischer Experimente von Bedeutung. Fall b) charakterisiert die Brauchbarkeit der Neutronenflußmessungen für die Reaktorsteuerung. Das gilt vor allem für kleine Meßwerte nach dem Abschalten des Reaktors, bei denen das physikalische G. wegen der langsam abklingenden Spaltproduktstrahlung stark ansteigt.

Das G.-N-V. läßt sich bei a) verkleinern, indem man um den Beobachtungsort Substanzen mit starker Gamma- und kleiner Neutronenabsorption, wie z. B. Blei oder Wismut, anordnet. Bei b) ergeben sich außerdem große Unterschiede des G.-N-V. zwischen den verschiedenen Detektortypen. Ein besonders kleines G.-N-V. besitzen die kompensierten Bor-Ionenkammern

und die sog. Spaltkammern bzw. -zählrohre. Durch geeignete Kombinationen mit a) läßt sich praktisch immer ein vernachlässigbar kleines G.-N-V. vom Typ b) über den ganzen in einem Reaktor auftretenden Flußbereich (etwa $1 : 10^8$ bis $1 : 10^{12}$) erzielen (s. a. Startverlauf, automatisches Startsystem, Periodenüberwachung). [9]

engl.: gamma-n-ratio *franz.: rapport γ-n*

Lit.: W. Abson, F. Wade, Proc. of The Inst. of El. Eng., Vol. 103, B, 590, 1956. – The Reactor Handbook, Vol. 2, Engineering, S. 946 ff., McGraw-Hill, New York, 1955. – P. R. Tunicliffe, H. Carmichael, Int. Rep. on Development of Ion Chambers for the NRU Reactor, At. Energy of Canada, RDP-64.

Gammaphon, meist tragbares Anzeigegerät für Gammastrahlung mit akustischer Anzeige. Geringe Genauigkeit. [6]

engl.: gammaphone *franz.: gammaphone*

Gammaquant (γ-Quant), Energiequant kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung (γ-Strahlung). Die Energie der von natürlich radioaktiven Stoffen emittierten G.n geht bis 4,9 MeV. Bei künstlichen Kernumwandlungen entstehen G.n bis über 17 MeV. Die Strahlungsquanten in der Bremsstrahlung des Betatrons sowie die in der kosmischen Strahlung können viel energiereicher sein (letztere bis 10^{16} eV). [1, 7]

engl.: gamma quantum *franz.: quantum gamma*

Gammaspektrum (γ-Spektrum). Unter G. versteht man das Energiespektrum der γ-Strahlen eines bestimmten radioaktiven Stoffes. Da γ-Strahlen 1. von den β-Strahlen in der Elektronenhülle sekundär erzeugt und 2. von den Kernen direkt emittiert werden, gibt es sowohl ein kontinuierliches G., das seinen Ursprung dem kontinuierlichen β-Spetrum verdankt, wie auch ein Linienspektrum. Die Energieniveaus dieses γ-Linienspektrums, das vielfach auch als Kernspektrum bezeichnet wird, geben wichtige Aufschlüsse über die Struktur der Kerne. [1]

engl.: gamma spectrum *franz.: spectre gamma*

Gammastrahlen (γ-Strahlen). Die G. sind neben den α- und β-Strahlen der dritte, magnetisch nichtablenkbare Anteil der Strahlung radioaktiver Stoffe. Während die α- und β-Strahlen Korpuskularstrahlen sind, handelt es sich bei den G. um Wellenstrahlen, genau

wie bei den R ö n t g e n - Strahlen und beim Licht, nur daß die Quantenenergie der G. gegenüber dem Licht rund eine millionmal, gegenüber den üblichen R ö n t g e n - Strahlen der Diagnostikröhre immer noch fast hundertmal höher, ihre Wellenlänge entsprechend niedriger ist. Da man jedoch heute auch R ö n t g e n - Strahlen erzeugen kann mit Quantenenergien, welche diejenigen der härtesten G. nicht nur erreichen, sondern weit übertreffen, bilden die G. nicht mehr, wie noch vor kurzem, die Fortsetzung des R ö n t g e n - Strahlen-Gebiets zu höheren Quantenenergien, sondern liegen in dem sehr viel größeren Bereich der R ö n t - g e n - Strahlen eingeschlossen. Da sie sich von diesen außer durch ihre Entstehungsart durch nichts unterscheiden, ist ihre Abgrenzung gegenüber den R ö n t - g e n - Strahlen nur noch insoweit berechtigt, als eben die Entstehungsart aus radioaktiven Kernen eine Rolle spielt.

G. ionisieren die Atome beim Durchgang durch Materie sehr viel weniger als β-Strahlen und erst recht als α-Strahlen. Sie sind daher sehr viel durchdringender als jene. Die Durchdringungsfähigkeit nimmt bis zu einigen MeV Quantenenergie mit dieser zu. Bei noch weiterer Steigerung der Quantenenergie nimmt jedoch die Durchdringungsfähigkeit wieder ab. Dies rührt daher, daß G. extrem hoher Quantenenergie nicht nur durch Ionisation und durch C o m p t o n - Effekt Energie verlieren, sondern zusätzlich auch durch *Paarerzeugung. Zahlenwerte des *Absorptionskoeffizienten der G.s bei R ö n t g e n - Strahlen. [1]

engl.: gamma rays *franz.: rayons gamma*

Gammastrahler, radioaktive Isotope, welche Gammastrahlen aussenden. Im erweiterten Sinne gibt es sechs Arten von Gammastrahlen:

1. Gammastrahlung aus dem Atomkern (eigentliche Gammastrahlung).
2. Durch Betastrahlung angeregte Röntgenfluoreszenzstrahlung.
3. Röntgenfluoreszenzstrahlung bei Elektroneneinfang des Kerns.
4. Röntgenfluoreszenzstrahlung bei Emission von Konversionselektronen.

5. Vernichtungsstrahlung an Positronenstrahlern (bei Vereinigung von Positron und Elektron).
6. Bremsstrahlung von schnellen geladenen Teilchen, insbesondere Betateilchen.

Die Strahler nach (1)–(5) besitzen ein Linienspektrum und können oftmals auf Grund ihres Spektrums identifiziert werden (*Impulshöhenanalyse). Das Spektrum der Bremsstrahlung ist dagegen kontinuierlich und nach hohen Energien zu durch die Maximalenergie der auslösenden Teilchenstrahlung begrenzt.

Einen Überblick über die in der Isotopentechnik gebräuchlichen G. gibt die Tabelle:

Tabelle der in der Isotopentechnik gebräuchlichen Gammastrahler (angeordnet nach Strahlungsenergie und Halbwertszeit)

Gammaenergie in Millionen eV	Halbwertszeit in Stunden = h, Tagen = d oder Jahren = a						
	< 1 h	1–6 h	6–24 h	1–5 d	5–30 d	30 d–1 a	> 1 a
0 bis 0.3		1) Ba 139		Xe 133 Pm 149 Sm 153 Au 199	Xe 133 2) Nd 147	Ce 141 Hf 181 Hg 203	
0.3 bis 0.5			Zn 69	Rh 105 2) La 140 Au 198	Cr 51 I 131	Ru 103 Sn 113 Hf 175	
0.5 bis 0.7		Br 80 Nb 97		1) As 76 Sb 122	1) Nd 147	1) Sb 124	1) Cs 134 Cs 137
0.7 bis 1.0		1) Mn 56 Ru 105 I 132	1) Ga 72 Zr 97			1) Sc 46 Co 58 Nb 95 Zr 95	2) Cs 134
1.0 bis 1.5		A 41 Ni 65 2) Ba 139	1) Na 24	2) As 76	Rb 86	2) Sc 46 Fe 59 Zn 65 2) Sb 124	Co 60
1.5 bis 3.0	Al 28 Cl 38	2) Mn 56	2) Na 24 K 42 2) Ga 72 Pr 142	1) La 140			

Es sind nur Gammastrahler mit verhältnismäßig einfachem Gammazerfallsschema aufgenommen. Bei Vorliegen von mehr als einer Gammagruppe wurde die bedeutendere mit 1), die nächst bedeutendere mit 2) bezeichnet.

Gammastrahler

Reine G. (1) sind sehr selten. Reinen Elektroneneinfang (3) zeigen: J 131, A 37, Ge 71, Fe 55. Übergänge mit Elektroneneinfang (3) und Gammastrahlung (1) finden statt an: Ba 131, Cr 51, Ga 153, Mn 54, Yb 165. Strahlung nach (1) und (4), allerdings begleitet von sehr energiearmen Konversionselektronen geht aus von: Sr 87, Tc 97, Sn 113. Emission von (1), (3) und (4) mit Konversionselektronen wird emittiert von: Hf 175, Ru 97, Se 75.

Die Strahlungen (1), (5) und (6), vor allem aber die eigentliche Gammastrahlung wird wegen ihrer Durchdringungsfähigkeit geschätzt. Die durchdringendste, allerdings sehr schwache Gammastrahlung besitzt Mangan 56 (3,0 MeV).

In der Isotopentechnik werden G. für Grobstrukturuntersuchungen an dicken Materialien verwendet, wofür sonst wesentlich teurere Röntgenanlagen erforderlich wären. In jenen Fällen, da Röntgenanlage und Bestrahlungsproben örtlich nicht vereinigt werden können, ist man auf die beweglicheren G. angewiesen. G. verwendet man auch zur Strahlungsbeeinflussung bestimmter Materialien, wie Lebensmittel (Pasteurisierung, Entkeimung), Kunststoffen, Ionen- und Valenzkristallen, zur Einleitung von chemischen Reaktionen (Polymerisation), Sterilisation usw. Als *Leitisotope sind G. besonders dann beliebt, wenn innerhalb von Maschinen, Apparaturen oder Stoffen Vorgänge zu betrachten sind, zu deren Kenntnis man nur über einen durchdringenden Indikator kommen kann. Verschiedentlich wurden G. auch zur Auslösung von Kernreaktionen benutzt (*Photoneutronenquelle). Ein reiches Feld bietet die Nutzung der verschiedenen Wechselwirkungen (Comptonstreuung, kohärente Streuung, Absorption usw.) von Gammastrahlung der verfügbaren Energieskala mit unterschiedlich zusammengesetzten Stoffen zur qualitativen und quantitativen stofflichen Untersuchung (Wasserstoffbestimmung, Aschegehalt der Kohle usw.). Auch in der Regeltechnik sind G. eingesetzt, besonders dann, wenn es sich um unzulängliche Vorgänge hinter dicken Mauern, innerhalb Behältnissen (Füllstandsregelung), unter hohem Druck oder hoher Temperatur handelt. Ein besonderer

Vorteil ist es, daß die Gammaintensität und -Energie unabhängig vom Zustand der Umgebung (versch. Temperaturen!) mit großer Konstanz abgestrahlt wird. [16]

engl.: γ-emitter *franz.: radiateur, émetteur γ*

Lit.: Radioactive Materials and Stable Isotops, Catalogue No. 4, Isotope Division, Harwell, Engl., 1957.

Gammastrahlspektrometer (γ-Strahl-Spektrometer), ein Apparat zur Aufnahme eines γ-Spektrums. Das G. beruht wie der R ö n t g e n - Spektrograph, mit dem es im Grundprinzip identisch ist, auf der Beugung am Raumgitter von Kristallen. Da jedoch die γ-Strahlen meist sehr viel kurzwelliger sind als die üblichen R ö n t g e n - Strahlen, werden die Beugungswinkel entsprechend kleiner und die Genauigkeit immer geringer, je kürzer die Wellenlänge, je höher also die Quantenenergie der γ-Strahlen wird. Man mißt deswegen die Quantenenergie bzw. Wellenlänge harter γ-Strahlen besser und genauer so, daß man durch sie Sekundärelektronen auslösen läßt und deren Energie mit dem β-Strahl-Spektrometer bestimmt. [1]

engl.: gamma-ray spectrometer
franz.: spectromètre à rayons gamma

Gamma-Uran, s. Uran.

Gammazerfall (γ-Zerfall), radioaktive Umwandlung eines Atomkerns, bei welcher ausschließlich γ-Strahlen ausgesandt werden. Da sich hierbei weder die Ordnungszahl noch die Massenzahl des Kerns ändert, gehören Ausgangs- und Endkern zum selben Isotop; sie können sich nur in der Anordnung ihrer Nukleonen unterscheiden (s. Kernisomerie). [1]

engl.: gamma transformation
franz.: désintégration gamma

Gamow-Berg, der Potentialwall des Kerns, s. G a m o w - Theorie. [1]

engl.: Gamow-wall *franz.: mur de Gamow*

Gamow-Theorie, die von G a m o w erstmals durchgeführte Anwendung der Wellenmechanik auf den Durchgang eines α-Teilchens aus dem Innern eines Kerns durch dessen Potentialwall nach außen (s. a. Tunneleffekt). Die G. gibt damit eine Erklärung für

die Aussendung von α-Strahlen durch radioaktive Kerne und vor allem für die Tatsache, daß die α-Teilchen eine geringere Energie haben als diejenige, die sie haben müßten, wenn sie vom höchsten Punkt des Potentialwalls aus beschleunigt würden. Sie liefert auch einen Zusammenhang zwischen der Austrittswahrscheinlichkeit des α-Teilchens und der kinetischen Energie, die es nach dem Austritt aus dem Kern besitzt. Dieser Zusammenhang gibt eine quantitative Erklärung der *Geiger-Nuttall-Beziehung. [1]
engl.: Gamow's theory
franz. théorie de Gamow

Gaschromatographie zur Trennung von Isotopen. Die gaschromatographische Trennung von Isotopen beruht auf der Adsorption des isotopen Gasgemisches an geeigneten Adsorbern, von denen es entweder durch ein Hilfsgas oder – unter Erwärmung der Kolonne vom Eintrittsende her – durch die leichter desorbierbare Komponente des Ausgangsgemisches verdrängt wird. [14]
engl.: gas chromatography
franz.: chromatographie (en phase) gaseuse

Gasdurchflußzähler nennt man ein *Zählrohr, bei dem das zu messende Präparat auf Grund der geringen Reichweite seiner Strahlung in das Zählrohrinnere verlegt wird. Das Zählrohr wird im Proportionalbereich betrieben, wobei das Füllgas dauernd durch neues ersetzt wird. Da das Zählrohr bei Atmosphärendruck arbeitet, dringt praktisch keine Luft durch die Fugen des Präparatezubringermechanismus in das Zählrohr ein. Es sind hiermit, da das Gerät im Proportionalbereich betrieben wird, neben β-Strahlung auch α-Strahlung (bei Mischstrahlern) nachweisbar. Als Füllgas hat sich Methan bewährt. [28]
engl.: gas flow counter
franz.: compteur pour gaz coulant

Gasfiltration, s. Sichten.
engl.: gas filtration, spez. auch *bag filtration*
franz.: filtration de gaz (épuration)

Gasreinigung, s. Abgase und Sichten.
engl.: off-gas treatment
franz.: épuration, purification des gaz

Gastheorie, kinetische. Im Gegensatz zur statistischen Mechanik und Thermodynamik, die das Gleichgewichtsverhalten der Materie beschreiben, werden in der k. G. auch Nichtgleichgewichtsvorgänge erfaßt. Man unterscheidet hier zwischen stationären und nichtstationären (zeitabhängigen) Nichtgleichgewichtszuständen. Nichtgleichgewichtsvorgänge treten immer dann auf, wenn *Transportvorgänge oder Reaktionen im Gas vorkommen. Reaktionen können jedoch auch im Gleichgewicht ablaufen und werden dann mit Hilfe der statistischen Thermodynamik behandelt.

Gastheorie, kinetische

Man unterscheidet ferner zwischen einer einfachen (oder modellmäßigen) und einer strengen k. G. In der einfachen k. G. wird angenommen, daß überall im Koordinatenraum eine Maxwellverteilung vorgegeben ist, bestimmt durch lokale Temperatur, lokale Dichte und den lokalen Wert der mittleren Massengeschwindigkeit (nullte Näherung der *Enskogschen Lösung). Ferner spielt der Begriff der mittleren freien Weglänge eine wesentliche Rolle. Diese ist definiert durch den Quotient aus mittlerer Geschwindigkeit und sekundliche Stoßzahl der Teilchen, $\lambda = \bar{v}/Z$, wobei diese Größen durch Integration über die Maxwellverteilung gewonnen werden. Die Transportgrößen (Diffusionskoeffizient, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit) werden durch eine Betrachtung des Transports einer Größe (Masse, Impuls, Energie) entlang einer freien Weglänge und Austausch durch Stoß abgeleitet.

In der s t r e n g e n k. G. geht man von einer Transportgleichung aus, die man als Fundamentalgleichung der k. G. auffassen kann. Diese wird meistens aus der gaskinetischen *B o l t z m a n - Gleichung gewonnen, indem man diese mit einer beliebigen Transportgröße (z. B. Masse, Impuls, Energie) multipliziert und über den Geschwindigkeitsraum integriert. Einsetzen expliziter Ausdrücke für die Transportgröße ergibt dann die makroskopischen Gleichungen (Kontinuitätsgleichung, Bewegungsgleichungen etc.). Dabei treten Integralgrößen auf, wie Massenstrom, Drucktensor, Wärmestromvektor etc., die durch Lösung der B o l t z m a n n - Gleichung gefunden werden können. In der *E n s k o g - schen Lösung werden diese Integralgrößen auf Diffu-

sionskoeffizienten, Viskosität und Wärmeleitfähigkeit zurückgeführt. Im Falle der *G r a d schen 13-Momenten-Methode ergeben sich aus der Transportgleichung ein System von partiellen Differentialgleichungen für die Zeit- und Ortsabhängigkeit der Transportgrößen. Die Verfahren der k. G., die auf der Lösung der B o l t z m a n n - Gleichung beruhen, haben nur beschränkte Gültigkeit wie diese selbst. So ist im Falle stochastischer Abhängigkeit der einzelnen Verteilungsfunktionen des Systems sowie in dem Fall, wo die Zeitdauer der wesentlichen intermolekularen Wechselwirkung (Stoß) nicht mehr klein ist gegen die freie Flugdauer eines Teilchens zwischen zwei Stößen (wie z. B. im Falle von Flüssigkeiten oder im *Plasma), die kinetische Theorie mit Hilfe der *L i o u v i l l e - Gleichung aufzubauen, die dann streng gültig ist. Für den Fall der Flüssigkeiten wurde eine solche Theorie von B o r n und G r e e n entwickelt und von K i r k - w o o d und Mitarbeitern weiter ausgebaut. In neuerer Zeit wird diese Methode auch a. d. kinetische Theorie der Plasmen angewandt. S. Hydromagnet. Gleichungen. [27]

engl.: kinetic theory of gases

franz.: théorie cinétique des gaz

Lit.: S. Chapman and T. G. Cowling, Mathematical Theory of Non-uniform Gases, Cambridge Univ. Press, London, 1952. – J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss and R. B. Bird, Molecular Theory of Gases and Liquids, Wiley, New York, 1954. – H. S. Green, Kinetic Theory of Fluids, Interscience Publ., New York, 1952. – J. G. Kirkwood et al., J. Chem. Phys. 14, 180 (1946), 15, 72 (1947), 17, 988 (1949), 18, 817 (1950), 19, 1173 (1951), 20, 929 (1952), 21, 2050 (1953), 22, 783 (1954), 22, 1094 (1954), 24, 375 (1956), 28, 136 (1958).

Gasturbinenreaktor. Bei einer Gasturbinenanlage läßt sich die Brennkammer bzw. der Lufterhitzer durch einen gasgekühlten Reaktor ersetzen. Dafür ist besonders der geschlossene Kreislauf (Bauart Escher Wyss) geeignet. Zur Erzielung eines Wirkungsgrades von 25 % muß die Gastemperatur am Reaktoraustritt etwa 700 °C betragen. Dies erfordert maximale Temperaturen im Reaktor in der Größenordnung von 1000 °C. Nach Überwindung der damit verbundenen technischen Schwierigkeiten wäre der Gasturbinenreaktor besonders für den Schiffsantrieb geeignet. [8]

engl.: gas turbine reactor

franz.: réacteur à turbine à gaz

Gasverstärkung, die durch die Stoßionisation bewirkte Vergrößerung der Ladungsimpulse eines Zählrohres

S. Zählrohr. [6]

engl.: gas amplification
franz.: renforcement par gaz

Gaswäsche, s. Sichten.

engl.: gas scrubbing
franz.: lavage de gaz

Gaszentrifuge zur Trennung von Isotopen. Im Zentrifugalfeld ist der Anreicherungsfaktor durch $q = [\exp - \Delta M\, \omega^2\, r_a{}^2/2\, R\, T]$ gegeben, worin ΔM die Massendifferenz, ω die Kreisfrequenz, r_a der lichte Radius des Zentrifugenrotors, R die Gaskonstante, T die absolute Temperatur ist. Im Gegensatz zu anderen Trennverfahren ist q von der absoluten, nicht von der relativen Massendifferenz abhängig. Aus diesem Grunde ist die Zentrifugenmethode besonders für die Anreicherung der Isotope schwerer Elemente geeignet, die in beliebig schwere Moleküle eingebaut werden können. Bei Umfangsgeschwindigkeiten von 300 m/s beträgt für $\Delta M = 1$ die primäre Anreicherung 1,8 %.
Eine Verstärkung der Anreicherung ist in einer Verdampfungszentrifuge möglich, bei der das Ausgangsgemisch als Flüssigkeit den Rand des Rotors bedeckt. An der Flüssigkeitsoberfläche ist der Dampfdruck der isotopen Komponenten – bis auf vernachlässigbar kleine Isotopieeffekte – gleich; im Dampf tritt jedoch eine Trennung auf. Beim Abpumpen des Dampfes aus der Achse unter Aufrechterhaltung des Gleichgewichts im Zentrifugalfeld erfolgt eine Einengung des Anfangsvolumens der Flüssigkeit auf ein Endvolumen, in dem die Anreicherung durch die Rayleighsche Gleichung (s. Trennmethoden) gegeben ist.
In einer Durchlauf-Zentrifuge strömt das zu trennende Gemisch an einem Ende des Rotors ein; die an- bzw. abgereicherten Fraktionen werden in der Achse bzw. am Rande des anderen Endes abgesaugt. Der Trenneffekt ist in diesem Fall gleich dem Trennschritt des Einzelprozesses.

Die thermisch gesteuerte Gegenstromzentrifuge verbindet den Zentrifugaleffekt (in horizontaler Richtung) mit einer Gegenstromkonvektion des Gases in axialer Richtung, die zu einer verstärkten Anreicherung der leichten Komponente am einen, der schweren am anderen Ende des Rotors führt. Der Multiplikationsfaktor ist vom Verhältnis Länge zu Durchmesser des Rotors abhängig. [14]
engl.: gas centrifuge *franz.: gas centrifuge*

Gaußsche Fehlerfunktion gibt an, wie die Fehler eines Resultates sich um den Mittelwert gruppieren. Sie wird dargestellt durch $f(x) = c \cdot e^{-ax^2}$ (s. a. Verteilung, Verteilungsgesetz). [7]
engl.: Gauss function
franz.: fonction d'erreur de Gauss

Gaußscher Bremskern, s. Bremskerne.
engl.: Gaussian kernel *franz.: noyau de Gauß*

Gauß'sches Fehlerintegral ist das Integral über die Fehlerfunktion, multipliziert mit einem Normierungsfaktor. Das G. F. gibt an, welcher Bruchteil der Meßwerte in einer bestimmten Umgebung des Mittelwerts liegt. In Formeln:

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\xi} e^{-x^2}\, dx .$$

Die Normierung ist so erfolgt, daß $\Phi(\infty) = 1$ ist. [7]
engl.: error function, Abk. erf ξ
franz.: intégrale d'erreur de Gauss

GCRE. Abk. für Gas Cooled Reactor Experiment. Versuchsleistungsreaktor, geplant von der USAEC. Metallische Brennstoff-Flüssigkeit, Graphit als Moderator, Edelgas als Kühlmittel. Für hohe Temperaturen. [24]

GEANP. Abk. für General Electric Aircraft Nuclear Propulsion, zwei Nullenergie-Versuchsreaktoren im Programm der US-Luftwaffe für Atomantrieb von Flugzeugen. Gebaut bzw. im Bau durch General Electric Co. in Evensdale, Ohio (USA). [24]

Gebiet, kaltes, Teil eines radiochemischen Laboratoriums, in dem nicht mit radioaktiven Substanzen gearbeitet wird. [18]
engl.: cold area *franz.: laboratoire froid*

Gebläse (s. a. Umwälzpumpen). Gasgekühlte Reaktoren erfordern wegen des *Druckverlustes im Kreislauf beträchtliche Pumpleistungen bis zu 20 % der Bruttoleistung der Anlage. Die G. müssen meist sowohl druckfest als auch druckdicht ausgeführt werden und entsprechend dem Leistungsbereich des Reaktors regelbar sein.

Außerdem werden im Reaktorbau G. zur Kühlung der Abschirmung für Klimaanlagen usw. benötigt. [8]

engl.: blowers *franz.: soufflante, ventilateur*

Geesthacht, Aufstellungsort des FRH, 40 km oberhalb Hamburgs an der Elbe. [7]

Gefährdungsdosis, maximal zulässige *Dosis, wenn klinische Schäden mit Sicherheit vermieden werden sollen. Für den Menschen wird nach dem Stand der heutigen Wissenschaft als G. eine einmalige Dosis von 25 rem (Ganzkörperbestrahlung) angenommen. [17]

engl.: permissible dose

franz.: dose admissible

Gefährdungsfaktor, s. Vergiftungsfaktor.

Gefriertrocknung, s. Kristallisieren.

engl.: freeze drying

franz.: dessication par sublimation de la glace = cryodessication

Gefüge. Räumlicher Aufbau eines polykristallinen Werkstoffes aus einzelnen *Kristalliten verschiedener kristallographischer Orientierung. Das G. ist gekennzeichnet durch Größe und Form der einzelnen Kristallite sowie durch deren *Kristallstruktur. Besitzen alle Kristallite die gleiche Kristallstruktur und die gleiche Zusammensetzung, so nennt man das G. h o m o g e n oder einphasig; im anderen Fall spricht man von einem h e t e r o g e n e n oder mehrphasigen G. – Die Sichtbarmachung des G.s erfolgt durch *Ätzen. S. a. Widmannstättensches Gefüge. [4]

engl.: grain structure

franz.: assemblage des grains

Lit.: E. Brandenberger, Grundriß d. allg. Metallkunde, Reinhardt, München, 1952.

Gegenstromelektrolyse zur Trennung von Isotopen. Der Einzeltrennfaktor q des Verfahrens wird durch ein chemisches Austauschgleichgewicht zwischen den Ionen

und Neutralteilchen oder zwischen verschiedenen Ionenarten eines gelösten isotopen Elektrolyten verursacht. Der Einzeltrenneffekt wird durch einen Gegenstrom vervielfacht, der durch Ionenwanderung in einem Flüssigkeitsstrom bewirkt wird; der Flüssigkeitsstrom wird so bemessen, daß das zu trennende Mischelement keine Überführung erleidet.

Wenn zwei gelöste isotope Ionen im elektrischen Feld verschieden schnell wandern, kann ein Flüssigkeitsstrom, der die entgegengesetzte Richtung der Ionenwanderung hat, so bemessen werden, daß das schneller wandernde Ion sich gerade noch stromaufwärts, das langsamer wandernde Ion sich schon stromabwärts bewegt (Gegenstromionenwanderung). S. a. Elektrolyse. [14]

engl.: counter-current electrolysis

franz.: électrolyse à contre-courant

Gegenstromzentrifuge, s. Gaszentrifuge.

engl.: counter-current centrifuge

franz.: centrifugeuse à contre-courant

Geiger-Müller-Zählrohr, s. Zählrohr.

engl.: G-M counter

franz.: tube compteur de Geiger-Müller

Geiger-Nuttall-Beziehung. Je kürzer die Halbwertszeit eines α-Strahlen aussendenden radioaktiven Stoffes ist, desto höher ist die Energie seiner α-Teilchen. Diese empirische Tatsache wird quantitativ ausgedrückt durch die G.-N.-B., welche besagt, daß zwischen dem Logarithmus der Energie E der α-Teilchen und dem Logarithmus der Halbwertszeit T ein linearer Zusammenhang besteht:

$$\ln E = a - b \ln T ,$$

allerdings streng genommen immer nur für eine radioaktive Zerfallsreihe. Für die verschiedenen Zerfallsreihen sind also die Konstanten a und b der G.-N.-B. etwas verschieden.

Theoretisch konnte später die G.-N.-B. durch die *Gamow-Theorie begründet werden. [1]

engl.: Geiger-Nuttall relation

franz.: relation de Geiger-Nuttall

Geigerscher Spitzenzähler, s. Spitzenzähler.

Gen, als Ausdruck für Erbfaktoren nach dem dänischen Botaniker J o h a n n s e n benannt. G.e sind die Erbanlagen, welche allein oder in Kombination mit anderen G.en die Ausprägung eines bestimmten, doch innerhalb gewisser Grenzen variablen Erscheinungsbildes (Phänotyp) bedingen. Eine besondere Eigenschaft ist die der Selbstreproduzierbarkeit. G.e bedingen jene Merkmalsunterschiede, bei deren Erbgang die M e n d e l schen Gesetze gelten (karyotische Vererbung). Sie liegen linear angeordnet und in bestimmten Abständen in der Chromosomenarchitektur. Es gibt auch G.e, die außerhalb des Kernes liegen (außerkaryotische Vererbung). G.e sind stabile Erbfaktoren, die sich nur in einem geringen Prozentsatz spontan abändern (*Mutation); sie können aber durch vielerlei Außeneinflüsse in verschieden hohem Prozentsatz unspezifisch abgeändert werden. Der Genbestand und die Genkombination eines Zellkernes werden mittels der somatischen Zellkernteilung (*Mitose) unverändert an die Tochterzellen weitergegeben. [28]
engl.: gene *franz.: gène*

Generationsdauer heißt die Zeit in der Kernkettenreaktion, die im Mittel von der Spaltung eines Atomkerns bis zu jenem Augenblick vergeht, wo die bei der Spaltung erzeugten Neutronen ihrerseits eine weitere Spaltung auslösen.
Für prompte Neutronen gelten in einem Reaktor folgende Zeitabschnitte:

a) Spaltung und Neutronenentstehung, Zeitdauer 10^{-14} s
b) Bremszeit Zeitdauer 10^{-5} bis 10^{-4} s
c) thermische Diffusion, Zeitdauer 10^{-4} bis 10^{-3} s.

Die Summe der drei „Lebensabschnitte" ist die durchschnittliche G. Man sieht, daß sie durch die Zeit der thermischen Diffusion bestimmt ist.
Bei *verzögerten Neutronen vergeht von der Spaltung bis zur Entstehung der Neutronen eine Zeit von 0,08 bis 80 s. Deren G. ist also durch diesen Abschnitt bestimmt. Das ist wichtig für die Reaktorsteuerung, s. Reaktorkinetik. [7]
engl.: generation time *franz.: temps de génération*

Geometrie, Bezeichnung für die Anordnung von Strahlenquelle, Streukörper und Detektor. Man spricht von einer guten G. beim Fadenstrahlversuch *(narrow beam)*. Hier werden die Photonen oder Partikel, die bereits durch einen Stoß aus dem Strahl herausgeschleudert wurden, nicht mehr vom Detektor registriert. Mit einer solchen Anordnung werden z. B. die Absorptionskoeffizienten für γ-Strahlen bestimmt. Eine

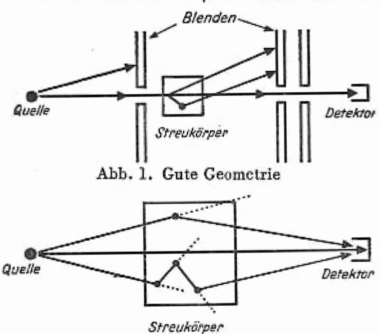


Abb. 1. Gute Geometrie

Abb. 2. Schlechte Geometrie

schlechte G. liegt dann vor, wenn den Detektor Teilchen erreichen, die nicht aus dem direkten Strahl kommen. Das ist der Fall bei einem Strahl mit großem Querschnitt *(broad beam)*. Das *Schwächungsgesetz ist im ersten Falle rein exponentiell, im zweiten Falle nicht mehr. Die Abweichung wird durch einen *Zuwachsfaktor ausgeglichen. [26]

engl.: geometry *franz.: géométrie*

Geometriefaktor, der Bruchteil g der Strahlung eines isotrop strahlenden Körpers, der nach geometrischen Prinzipien auf einen Strahlendetektor auftrifft. Quelle und Detektor können hierbei die verschiedensten Formen haben. Am einfachsten ist die Berechnung des G. für eine punktförmige Quelle S, der in einem Abstand r ein Detektor mit der wirksamen Fläche F gegenübersteht. Hier ist

$$g = \frac{F}{4\pi r^2}. \qquad [17]$$

engl.: geometry factor *franz.: facteur de la géométrie*

Geometrie-Transformation ist eine Methode, um von einer Geometrie (z. B. einer Zylinder-Quelle), deren Flußverteilung experimentell ermittelt wurde, auf eine andere Geometrie (z. B. Toroid-Quelle) so überzugehen, daß die Flußverteilung der neuen Geometrie als Funktion der alten dargestellt ist. [26]
engl.: geometry transformation
franz.: transformation de la géométrie
Lit.: Reactor Handbook, Vol. 1, Physics, McGraw-Hill, New York, 1955.

Germanium 71 erhält man durch Bestrahlung der seltenen Erde Germanium mit langsamen Neutronen über den (n, γ)-Prozeß: ^{70}Ge (n, γ) ^{71}Ge. Das Isotop ist ein reiner K-Strahler, der als solcher in der Isotopentechnik wegen seiner weichen Röntgen-Strahlung interessant ist. Die bei der Bestrahlung miterzeugten Störaktivitäten des

^{75}Ge	Halbwertszeit	82 Minuten
^{77}Ge	Halbwertszeit	12 Stunden
^{77}As	Halbwertszeit	38,7 Stunden

klingen relativ rasch ab. Halbwertszeit des ^{71}Ge 11,4 Tage. – In der Halbleitertechnik ist die Mikroanalyse durch Aktivierung des Ge wichtig. [16]
engl.: germanium *franz.: germanium*

Gesamteinfluß, s. Neutroneninhalt, verallgemeinerter.
engl.: total importance *franz.: importance totale*

Gesamtwirkungsgrad einer Atomkraftanlage nennt man das Verhältnis der Nettoenergieerzeugung zur Wärmeerzeugung im Reaktor. Maßgeblich für seine Größe sind der thermische Wirkungsgrad, die Maschinenwirkungsgrade, der Kraftbedarf der Hilfsmaschinen und die Wärmeverluste. S. a. Leistungsreaktoranlage, Wirkungsgrad. [8]
engl.: plant efficency *franz.: rendement total*

Geschwindigkeit, relativistische, ist eine solche G., die sich der Lichtgeschwindigkeit c nähert. Man wird G.n mit $v > c/10$ i. a. als relativistisch bezeichnen, da in diesem Bereich die Gesetze der Relativitätstheorie andere Ergebnisse liefern als die Newtonsche Physik. [7]
engl.: relativistic velocity *franz.: vitesse relativiste*

Geschwindigkeit, thermische

Geschwindigkeit, thermische. Die Neutronen in einem thermischen Reaktor haben im wesentlichen eine Geschwindigkeitsverteilung nach dem Maxwell-Boltzmannschen Verteilungsgesetz, die bei hohen Energien in eine Verteilung proportional $1/v$ übergeht. Die Anschlußstelle der zweiten an die erste Verteilung liegt unabhängig vom Typ des thermischen Reaktors bei 0,17 eV. Die thermische Geschwindigkeitsverteilung von n_0 Neutronen ist

$$n(v) = 4\,\pi\, n_0 \cdot v^2 \cdot \left(\frac{m}{2\,\pi\, k\, T}\right)^{3/2} \cdot e^{-(m v^2/k T)} \qquad (1)$$

S. Abb. Die häufigste G. ist

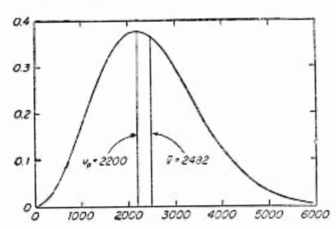
$$\bar{v}_h = \sqrt{\frac{2\,k\,T}{m}} = 2200 \text{ m/s bei } 20\,°\text{C}. \qquad (2)$$

Die mittlere thermische G. findet man durch Berechnung von $1/n_0 \int_0^\infty n(v) \cdot v\, dv$.

Es ist

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8\,k\,T}{\pi\, m}} = 2482 \text{ m/s bei } 20\,°\text{C}. \qquad (3)$$

$$\frac{\bar{v}}{v_h} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1{,}128\,. \qquad (4)$$



Relative Häufigkeit der Neutronen in Funktion der Geschwindigkeit (in m/s) bei 20 °C

Dieser Faktor wird oft für die Umrechnung von thermischen Absorptionsquerschnitten gebraucht. Die effektiven thermischen Absorptionsquerschnitte folgen aus

$$\overline{\sigma_a} = \frac{\int n(v) \cdot v \cdot \sigma_a(v) \cdot dv}{\int n(v) \cdot v \cdot dv} \qquad (5)$$

mit $n(v)$ nach (1). Da die thermischen Wirkungsquerschnitte durchweg für 2200 m/s-Neutronen angegeben werden und da

$$\sigma_a(v) = \sigma_a(2200) \cdot \frac{2200}{v}, \qquad (6)$$

wird

$$\overline{\sigma_a} = \frac{v_h}{\bar{v}} \cdot \sigma_a(2200) = \frac{\sigma_a(2200)}{1{,}128}.$$

Abweichungen vom $1/v$-Gesetz, die hierbei zu berücksichtigen sind, werden in den Tabellen der Wirkungsquerschnitte angegeben. [7]
engl.: thermal velocity
franz.: velocité thermique, vitesse thermique

Geschwindigkeitsfokussierung. In einer Anordnung von elektrischen und magnetischen Ablenkfeldern (s. Ablenkung, elektrische und magnetische) spricht man von G., wenn die Bahnen aller geladenen Teilchen gleicher spezifischer Ladung, die von einem Punkt aus in gleicher Richtung, dagegen mit verschiedener Geschwindigkeit, in das Feld hineinlaufen, sich wieder in e i n e m Punkt schneiden, was sich durch einen speziellen Feldverlauf erreichen läßt. Besonders wichtig ist die G. im Massenspektrographen, vor allem wenn sie mit der *Richtungsfokussierung zur *Doppelfokussierung vereinigt wird. [1]
engl.: velocity focussing
franz.: focalisation des vitesses

Geschwindigkeitsverteilung, s. Verteilungsfunktion und Statistik.
engl.: velocity distribution
franz.: distribution des vitesses

Gesenkschmieden. Warmverformungsverfahren, bei welchem der Werkstoff unter dem Druck eines Fallhammers oder einer Presse eine mehrteilige, geschlossene Gesenkform ausfüllt. Dieses Verfahren ist geeignet zur Serienfertigung von hochfesten Konstruktionsteilen guter Maßgenauigkeit und geringer Nacharbeit. [4]
engl.: drop forging *franz. matriçage*

1/v-Gesetz

Gesetz, $1/v$-. Die Absorption von Teilchen, insbesondere Neutronen, durch Kerne erfolgt i. a. nach dem $1/v$-G. Das heißt, es ist

$$\sigma_a \sim \frac{1}{v}.$$

Unter Absorption sind sowohl (n, γ)-, (n, p)- usw. Prozesse wie Spaltprozesse zu verstehen. Die physikalische Ursache liegt darin, daß die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion des Neutrons mit dem Kern um so größer ist, je länger sich das Neutron in der Nähe des Kerns aufhält.
Abweichungen vom $1/v$-G. kommen vor und werden in den Tabellen der Wirkungsquerschnitte angegeben. S. a. Geschwindigkeit, thermische. [7]
engl.: 1/v law *franz.: loien 1/v*
Lit.: Hughes et al., Neutron Cross Sections, BNL 325 mit 1 Add., auch: McGraw-Hill, New York, 1955/57.

Getting-Schaltung. Verbindung einer Zählrohranode mit dem Eingang einer Kippschaltung. Durch den Zählrohrimpuls wird ein Kippvorgang ausgelöst, der einen vielfach stärkeren Impuls liefert. [6]
engl.: Getting circuit *franz.: montage de Getting*

GeV (Abk. für Giga-Elektronenvolt). Es ist 1 GeV = 1000 MeV = 10^9 eV. Statt GeV wird in der angelsächsischen Literatur BeV („billion“ Elektronenvolt) gebraucht. [1]

Gewebedosis, s. Dosis.
engl.: tissue dose *franz.: dose tissulaire*

Gewicht, statistisches. 1. Das Grundgesetz der physikalischen Statistik besagt, daß jeder Zustand eines Systems (also jede Zelle des Phasenraums) mit gleicher Wahrscheinlichkeit angenommen wird. Jedem Zustand entspricht eine bestimmte Energie. Es ist jedoch im allgemeinen die Zuordnung keineswegs eindeutig. Vielmehr können mehrere Zustände zu ein und derselben Energie gehören. In diesem Fall spricht man von Entartung des Systems. Das s. G. gibt den Entartungsgrad an. Es hat den Wert 1, wenn man nur eine Realisierungsmöglichkeit eines bestimmten Energiewerts hat (keine Entartung); es ist g, wenn es g solche Möglichkeiten gibt.

2. In der Reaktorkinetik nennt man s. G. einer Zone Z im Reaktor den Ausdruck

$$G(Z) = \frac{_Z\int \Phi^2 \,\mathrm{d}V}{_R\int \Phi^2 \,\mathrm{d}V},$$

wobei Φ den Neutronenfluß und R das gesamte Reaktorvolumen bedeutet. Man verwendet das s. G. zu einer vereinfachten *Störungsrechnung bei kleinen Änderungen im Reaktor. Wird z. B. ein Absorber mit dem Querschnitt Σ_a homogen verteilt in die Zone Z_0 des Reaktors eingebracht, so resultiert daraus eine Reaktivitätsänderung

$$\frac{\delta k}{k} = \frac{\delta[(k_\infty - 1)\Sigma_a]}{k_\infty \Sigma_a} \cdot G(Z_0) \,. \qquad [7, 13]$$

engl.: statistical weight *franz.: poids statistique*

Gewichtsdurchsatz, in der Reaktortechnik der in Gewichtseinheiten gemessene *Durchfluß. [8]
engl.: mass flow
franz.: débit-poids

Gewichtsfunktion heißt derjenige Zahlwert, der das statistische *Gewicht eines Zustandes angibt. [7]
engl.: weighting function
franz.: fonction de poids, f. de pondération

gewichtslos, s. Nachtrag.

Gewinnoperator, s. Einfluß, Multiplikationsfaktor und Reaktorgleichung.

gg-Kerne, s. Kern.
engl.: even-even nuclei *franz.: noyau pair-pair*

Gifte, s. Reaktorgifte.

Ginnssche Gleichung, s. Nachtrag,

Gitter. Bei einem Reaktor wird gelegentlich der regelmäßige Wechsel von Brennstoffelementen und Moderator als G. bezeichnet, s. a. Zelle. [7]
engl.: lattice
franz.: réseau

Gitter, Kristallgitter. Eine regelmäßige Anordnung von Atomen, Ionen oder Molekülen in einem Kristall, die durch identische Wiederholung und Aneinanderreihung der *Elementarzelle entsteht. Röntgenstrahlen

(und auch Korpuskularstrahlen, etwa Elektronen oder Neutronen) erfahren beim Durchgang durch ein solches Raumgitter Interferenzen, aus welchen sich die *Kristallstruktur ermitteln läßt. [4]

engl.: lattice

franz.: réseau cristallin

Lit.: R. Glocker, Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, 3. Aufl., Springer, Berlin, 1949. – H. Jagodzinski, Kristallographie, Handbuch der Physik, Bd. VII/1, Springer, Berlin, 1955.

Gitterfehlstelle. Störung der idealen Ordnung in einem Kristallgitter, etwa durch *Leerstellen, besetzte *Zwischengitterplätze, *Frenkel-Defekte, *Versetzungen. [4]

engl.: lattice distortion

franz.: défauts du réseau

Gitterkonstante (Gitterparameter). Kantenlänge der *Elementarzelle eines Kristallgitters. Die G. der Metalle liegen in der Größenordnung von etwa 3 bis 6 Å (1 Å = 10^{-8} cm). [4]

engl.: lattice constant

franz.: constante réticulaire, paramètre cristallin

Gitterrost. Ein G. wird besonders bei gasgekühlten Reaktoren zur Auflagerung des Reaktorkerns verwendet. Bei den neuen englischen Kernkraftwerken (z. B. Hunterston) ergeben sich Durchmesser von ca. 15 m und Belastungen von etwa 3000 t. Zur Festigkeitsberechnung wurden elektronische Rechenmaschinen verwendet. [8]

engl.: diagrid

franz.: grillage, grille

GLEEP. Abk. für Graphit Low Energy Experimental Pile. Erster in Großbritannien in Betrieb genommener Atomreaktor (15. August 1947). Forschungsreaktor im Atomforschungszentrum Harwell. Natürliches Uranmetall und Uranoxyd als Brennstoff, Graphit als Moderator, luftgekühlt. Wärmeleistung 100 kW. [24]

Glätten, s. Flußabflachung.

Gleichgewicht. a) Chemisches G., s. Massenwirkungsgesetz.

b) Radioaktives G. Ist das Folgeprodukt eines radioaktiven Stoffes, wie es meist der Fall ist, selbst wieder radioaktiv, so sammelt es sich beim Zerfall des Ausgangsstoffes nicht unbegrenzt an, da es ja selbst wieder zerfällt. In diesem Fall strebt das Mengenverhältnis der beiden Stoffe vielmehr einem Gleichgewichtszustand zu, dem r. G., das dann vorhanden ist, wenn das Mengenverhältnis zeitlich konstant geworden ist, beide Stoffe also (trotz verschiedener Halbwertszeit!) nach derselben Zeitfunktion abnehmen. Ein solches r. G. kann allerdings nur eintreten, wenn das Folgeprodukt eine kürzere Halbwertszeit hat als der Ausgangsstoff. Am einfachsten liegen die Verhältnisse, wenn der Ausgangsstoff eine so lange Halbwertszeit besitzt, daß seine Menge praktisch als zeitlich konstant gelten darf. Dann ist im r. G. auch die Menge des Folgeproduktes konstant, d. h. es bilden sich von ihm in der Zeiteinheit ebensoviele Atome aus dem Ausgangsstoff, wie wieder zerfallen. Ebenso sind alle etwaigen weiteren Folgeprodukte in konstanter Menge vorhanden (falls alle ihre Halbwertszeiten klein gegen die des Ausgangsstoffes sind) und die Anzahl Atome der einzelnen Stoffe verhalten sich im r. G. wie die reziproken Zerfallskonstanten oder einfach wie die Halbwertszeiten. Je kurzlebiger ein Stoff der Reihe ist, in desto geringerer Menge ist er vorhanden.

c) Strahlenchemisches G., Zustand der sich nach einer bestimmten Zeit in einem bestrahlten System einstellt. [1, 18]

engl.: equilibrium *franz.: équilibrium*

Gleichgewichtskonstante, s. Austauschreaktionen.

engl.: equilibrium constant

franz.: constante d'équilibre

Gleichgewichtskonzentration. Durch Spaltung, Neutroneneinfang oder radioaktiven Zerfall entstehen in einem Kernreaktor bestimmte Isotope chemischer Elemente. Andererseits können diese Isotope durch einen oder mehrere der genannten Effekte auch wieder verbraucht werden, wobei dieser Verbrauch der jeweils vorhandenen Konzentration des betrachteten Isotops proportional ist. Jene Konzentration, bei der Erzeugungs- und Verbrauchsrate gleich groß sind, nennt man

die G. des Isotops. Sie ist von der Reaktorbauart und von der Konzentration der übrigen Stoffe im Reaktor abhängig (s. Gleichgewicht, radioaktives). [12]
engl. equilibrium concentration
franz.: concentration d'équilibre

Gleichgewichtszeit, s. Kaskade.

Gleichmäßigkeitskoeffizient, s. Körnung.

Gleichstrom-Glimmentladung zur Trennung isotoper Moleküle. Durch die bei G.-G.n in Mischungen isotoper Moleküle eintretenden Ionisations-, Dissoziations- und Rekombinationsvorgänge tritt eine Anreicherung des schweren Isotops an der Kathode ein, wenn das Atom eine geringere Ionisierungsspannung hat als das Molekül und umgekehrt. Wenn sich an den Enden des Glimmentladungsrohres Vorratsbehälter befinden, wird durch das Zusammenwirken von Ionenströmung, Poiseuillescher Rückströmung und Rückdiffusion eine Vervielfachung des Primäreffektes verursacht. [14]
engl.: direct current glow discharge
franz.: décharge à courant continu (dans un gaz)

Gleichstromzentrifuge, syn. f. Durchfluß-Zentrifuge, s. Gaszentrifuge.

Gleichung, kritische, s. kritische Gleichung.
engl.: critical equation *franz.: équation critique*

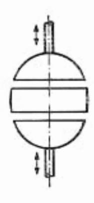
Gleitung. Gegenseitige Verschiebung von Bereichen eines Kristalls auf einer Netzebene des Gitters (Gleitebene) unter der Wirkung einer Schubspannung. Gleitvorgänge in den Kristalliten eines polykristallinen Werkstoffes sind die Elementarvorgänge, auf denen die plastische Verformung beruht (*Versetzung). [4]
engl.: slip *franz.: glissement*

Glockenboden, s. Bodenkolonne.
engl.: bubble-cap plate *franz.: plateau à cloches*

Glockenzählrohr, *Fensterzählrohr für Geiger-Müller-Strahlungsmessung mit glockenförmiger Mantelelktrode um den Zähldraht. Die Öffnung der Glocke ist mit einem dünnwandigen Fenster aus Kunststoff, Glimmer oder Aluminium überspannt. Dadurch wird energiearmer weicher Strahlung der Eintritt in das Zählrohr ermöglicht. [16]
engl.: end tube widow countes
franz.: tube compteur à cloche

Glühen (Tempern). Behandlung eines Werkstoffes bei erhöhter Temperatur. Durch Glühungen werden metastabile Zustände und innere Spannungen in Metallen und Legierungen abgebaut; dadurch werden die physikalischen und technologischen Eigenschaften in weiten Grenzen beeinflußt. Außerdem kann sich auch die Zusammensetzung einer Legierung beim G. ändern, indem eine Komponente bevorzugt verdampft (z. B. oberflächliche Entzinkung von geglühtem Messing) oder durch eine chemische Reaktion verbraucht wird. Ein Beispiel für den letztgenannten Vorgang ist der Temperguß, der hergestellt wird, indem man weißes *Gußeisen etwa 50 Stunden lang bei 900 °C in oxydierender Atmosphäre glüht, wobei das Eisenkarbid in *Gamma-Eisen und Graphit zerfällt, und der Graphit durch Oxydation beseitigt wird. [4]
engl.: annealing *franz.: recuire*

Godiva, ein nackter, schneller, aus reinem ^{235}U bestehender Forschungsreaktor in Los Alamos (der Name G. bezieht sich auf eine sagenhafte Königin, die nackt durch die Stadt Coventry reiten mußte).



G. bestand aus zwei halbkugelförmigen Körpern und einem Mittelteil (Abb.). Die Steuerung wurde durch Veränderung des Abstandes bewirkt. Bei einem Versuch wurde G. überkritisch und zerstört, ohne größeren Schaden anzurichten. Derzeit arbeitet Godiva II. Dieser Typus, der eine Art kontrollierter Atombombe darstellt, wird zur Erzielung intensiver Impulse von schnellen Neutronen verwendet. [13]

Gold 198 und 199. Die beiden radioaktiven Isotope werden als Isotope des Edelmetalls Gold oftmals zur Indizierung von Substanzen und in der Medizin z. B. als kolloidal verteilte Strahlungsquelle benutzt. ^{198}Au gewinnt man durch Bestrahlung von natürlichem Gold mit langsamen Neutronen über die Reaktion: ^{197}Au (n, γ) ^{198}Au. Mit schnellen Neutronen führt ein (n, γ)-Prozeß an Quecksilber (^{198}Hg und ^{199}Hg) zu den beiden radioaktiven Au-Isotopen. Die übliche Erzeugung von Au^{199} läuft jedoch ebenfalls über einen (n, γ)-Prozeß mit langsamen Neutronen an Platin

(^{198}Pt) ab. Es entsteht zunächst ein ^{199}Pt-Kern, der sich mit einer Halbwertszeit von 29 Minuten durch Betaemission in ^{199}Au verwandelt. Bei beiden Isotopen handelt es sich um Betastrahler mit Gammaübergängen unterhalb 0,5 MeV. Die Halbwertszeiten sind nahezu gleich (2,69 bzw. 3,15 Tage). [16]
engl.: gold *franz.: or*

Gonaden, Keimdrüsen, in denen die Geschlechtszellenbildung (Eier, Samenzellen) stattfindet. Die therapeutische Kastrationsdosis für die Eierstöcke der Frau liegt bei ca. 350 r. Die männlichen Keimdrüsen sind ähnlich strahlenempfindlich. Gegen Dauerbestrahlungen ist das Keimdrüsengewebe auch schon bei kleinen Strahlendosen empfindlich. [28]
engl.: gonads *franz.: gonades*

van de Graaff-Generator, s. Bandgenerator.
engl.: van de Graaff generator
franz.: générateur van de Graaff

Gradsche Lösung der Maxwell-Boltzmann-Gleichung in der kinetischen Gastheorie. Es sei $f(\mathfrak{r}, \mathfrak{v}, t)$ eine Wahrscheinlichkeitsdichte im Kolmogoroffschen Sinne, so daß die Verteilung durch ihre Momente definiert ist (Verteilung $f(x)$, Momente $M^{(n)} = \int x^{(n)} f(x)\,\mathrm{d}x$, $x^{(n)}$ = Tensor n-ter Stufe). Wenn man $f(\mathfrak{r}, \mathfrak{v}, t)$ in eine Reihe Hermitescher Polynome entwickelt, deren Konvergenz für den eindimensionalen Fall bewiesen ist,

$$f = \text{const}\, e^{-\frac{1}{2} u^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left\{ \sum_{ij} a_{ij\ldots}^{(m)} H_{ij\ldots}^{(m)} (\mathfrak{u}) \right\}$$

($\mathfrak{u}$ ist eine Geschwindigkeit, dividiert durch $\sqrt{RT}$, und die Koeffizienten $a_{ij\ldots}^{(m)}$ sind nur Funktionen des Ortsvektors $\mathfrak{r}$ und der Zeit t), so kann man mit Hilfe der Orthogonalitätsrelationen für die Hermiteschen Polynome zeigen, daß die $a_{ij\ldots}^{(m)}$ die Geschwindigkeitsmomente

$$a_{ij\ldots}^{(m)} = M_{ij\ldots}^{(m)} (\mathfrak{r}, t) = \int V_i V_j \ldots f(\mathfrak{r}, \mathfrak{v}, t)\,\mathrm{d}\mathfrak{v}\,,$$

$$\mathfrak{V} = \mathfrak{v} - \bar{\mathfrak{v}}_0\,, \quad \bar{\mathfrak{v}}_0 = \frac{1}{\varrho} \sum_i n_i m_i \int \mathfrak{v} f_i\,\mathrm{d}\mathfrak{v}$$

sind. Diese Momente haben z. T. physikalische Bedeu-

tung. Das Geschwindigkeitsmoment nullter Ordnung ist die Massendichte ϱ (n Teilchendichte)

Gradsche Lösung

$$m \int f(\mathfrak{r}, \mathfrak{v}, t)\, d\mathfrak{v} = m\, n\,,$$

das Moment 1. Ordnung der Massenstromvektor

$$m \int V_i f\, d\mathfrak{v} = j_i\,,$$

das Moment 2. Ordnung der Drucktensor

$$P_{ij} = m \int V_i V_j f\, d\mathfrak{v}\,.$$

Durch Verjüngung des Moments 3. Ordnung

$$Q_{ijk} = m \int V_i V_j V_k f\, d\mathfrak{v}$$

entsteht der Wärmestromvektor

$$2\, q_j = m \int V^2 V_j f\, d\mathfrak{v}\,.$$

Verjüngung des Moments 2. Ordnung liefert den skalaren (hydrostatischen) Druck (im Gleichgewicht!)

$$p = \frac{1}{3} \sum_i P_{ii} = \frac{1}{3}\, m \int V^2 f\, d\mathfrak{v}\,.$$

Beschränkt man sich in der Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsdichte f auf das nullte, erste und zweite Moment und auf die Verjüngung des Moments 3. Ordnung, dann resultiert die G r a d sche 13-Momenten Approximation,

$$f = f^{(0)} \left\{ 1 + \frac{1}{\varrho R T} \sum_i j_i V_i + \frac{1}{2\, \varrho (R T)^2} \sum_{ij} p_{ij} V_i V_j + \frac{1}{\varrho (R T)^2} \left(\frac{V^2}{5 R T} - 1 \right) \sum_i q_i V_i \right\};$$

$$f^{(0)} = \text{const}\, e^{-V^2/2RT}\,.$$

Durch Multiplikation der B o l t z m a n n - Gleichung mit den entsprechenden Geschwindigkeitstensoren $V^{(m)}_{ij\ldots}$ und nachfolgender Integration erhält man ein System simultaner Differentialgleichungen für die Momente, wenn die Größen, die durch Integration über das Stoßintegral der B o l t z m a n n - Gleichung entstehen, sich durch Momente ausdrücken lassen. Im G r a d schen Fall (einkomponentiges Gas aus M a x -

w e l l schen Molekülen) ist dies möglich. Unter Durchführung einer Erweiterung und gewissen Modifikation läßt sich die G r a d sche Methode auch auf den Fall reagierender Plasmen anwenden. Die G r a d sche Methode ist besonders für extreme Nichtgleichgewichtserscheinungen geeignet. [27]

engl.: Grad's solution

franz.: solution de Grad

Lit.: H. Grad, Comm. Pure Appl. Math. 2, 331, 1949. – H. J. Kaeppeler, Mitt. Forsch. Inst. Physik der Strahlantriebe, Nr. 15, Stuttgart, 1958.

Graetz-Zahl. Die G.-Z. ist eine in der amerikanischen Literatur häufig benützte dimensionslose Kennzahl (s. Ähnlichkeitsgesetze). [5]

engl.: Graetz-No. *franz.: nombre de Graetz*

Grammatom. Diejenige Menge eines chemischen Elementes, die ebensoviele Gramm enthält wie das Atomgewicht des Elementes angibt, also z. B. 1,008 g Wasserstoff, 16 g Sauerstoff, 55,8 g Eisen usw. Das G. j e d e s Elementes enthält $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Atome (L o s c h m i d t - Zahl). Dies gilt auch dann, wenn das Element ein Gemisch mehrerer Isotope ist, da ja dann sein Atomgewicht schon den entsprechenden Mittelwert aus den Massenzahlen der einzelnen Isotope darstellt. [1]

engl.: gram atom

franz.: atome-gramme

Grammolekül (oder M o l), diejenige Menge eines chemisch einheitlichen Stoffes (chemisches Element oder Verbindung), die ebenso viele Gramm enthält, wie das Molekulargewicht des Stoffes angibt; also z. B. (rund) 2 g Wasserstoff H_2, 32 g Sauerstoff O_2 (aber 48 g Ozon O_3!), 18 g Wasser H_2O usw. Das G. j e d e s chemisch einheitlichen Stoffes enthält $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Moleküle (L o s c h m i d t - Zahl). Meist wird für das G. die kürzere Bezeichnung M o l gebraucht. Alle Größen, die molekular bedingt sind, werden zweckmäßig auf 1 Mol eines Stoffes bezogen, falls man sie nicht auf 1 Molekül beziehen will, was für die Praxis unbequeme Größenordnungen liefern würde. [1]

engl.: gram molecule

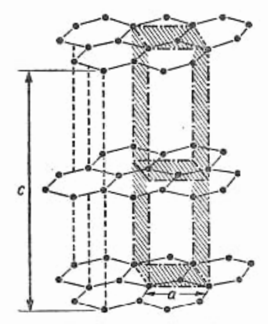
franz.: mole, molecule-gramme

Gramm-rad, Einheit der *Integraldosis, entspricht der Absorption von 1 *rad in 1 g Materie und damit der Energieabsorption von 100 erg. [17]
engl.: gram rad *franz.: gramme-rad*

Gramm-Röntgen, Einheit der *Integraldosis. 1 Gramm-Röntgen ist die Energie, die an 1 g Luft bei Bestrahlung mit einer Dosis von 1 r abgegeben wird. Diese Energie entspricht 83,7 erg. [17]
engl.: gram-Roentgen *franz.: Roentgen-gramme*

Granulozyt, weißes Blutkörperchen mit anfärbbaren Körnchen im Zelleiweiß. Granulozytopenie svw. *Agranulozytose. [28]
engl.: granulocyte *franz.: granulocyte*

Graphit ist eine Kristallform des Kohlenstoffs. Das G.-Gitter ist hexagonal mit ausgesprochenem Schichtcharakter (s. Abb.). Die Elementarzelle hat die Ab-



Struktur von Graphit

messungen $a = 2{,}456$ Å und $c = 6{,}680$ Å, der kürzeste Atomabstand beträgt 1,42 Å und die Dichte ist 2,25 g/cm^{-3}. Jede dritte Schicht ist mit der ersten wieder identisch. Bei hochdispersem G. ist das Gitter schon stark abgebaut, um beim vollkommen amorphen G. (Ruß) röntgenographisch nicht mehr erkennbar zu sein. Die Dichte nimmt bei diesem Gitterabbau ebenfalls ab, und zwar bis zu etwa 1,6 g/cm^3. Ein G. dieser Art ist praktisch isotrop. G. schmilzt nicht unter Atmosphärendruck, sondern sublimiert bei etwa 3650 °C. Natürlicher G. wird vor allem auf der Insel Ceylon, auf Madagaskar, in den USA, in Ostsibirien und in

geringerem Maße bei Passau gefunden. Künstlicher G. entsteht, wenn sich aus Kohlenstoffverbindungen bei sehr hoher Temperatur Kohlenstoff abscheidet.

G. wird häufig als Moderator und Reflektor verwendet. Wegen der großen Reinheitsforderung kann man nur künstlichen G. verarbeiten. Dieser G. wird z. B. hergestellt aus Petroleumkoks. Seine Dichte ist 1,6 bis 1,7 g/cm^3, seine wichtigsten Daten sind $L = 50{,}0$ cm, $D = 0{,}92$ cm, $\Sigma_a = 0{,}00037$ cm^{-1}, $\xi = 0{,}158$, $\xi \, \Sigma_s = 0{,}063$ cm^{-1}, Bremsverhältnis 170.

Die Schichtenstruktur des G. wird durch die Reaktorstrahlung, insbes. durch schnelle Neutronen beeinflußt. Der Abstand der Schichten wird gedehnt. Durch die von der Herstellung her stets vorhandene Textur äußert sich diese Ausdehnung in einem makroskopischen Wachstum, dem auffälligsten *Strahlenschaden im G. Daneben findet eine Versprödung statt, die Festigkeit und Härte nimmt zu, die elektrische und thermische Leitfähigkeit ab. Diese Schäden sind um so stärker, je niedriger die Bestrahlungstemperatur ist. Durch Ausheizen kann man die Strahlenschäden zum größten Teil ausheilen. Dabei wird aber die durch die *Frenkel-Defekte gespeicherte Energie *(stored energy)*, die je nach Bestrahlungsdosis und -temperatur einige hundert cal/g betragen kann, frei und kann die Temperatur in unkontrollierbarer und unzulässiger Weise erhöhen. Bei graphitmoderierten Reaktoren ist der Reaktorkern einschließlich Reflektor meist ein Graphitzylinder (bzw. -würfel) von beträchtlichen Abmessungen. Er ist aus genau bearbeiteten Graphitblöcken zusammengesetzt. Die durch Wärme und Bestrahlung auftretenden (ungleichförmigen) Dehnungen dürfen keine unzulässigen Spannungen erzeugen. Ferner müssen die Brennstoffkanäle bei der Ausdehnung gerade bleiben. Deshalb wurden z. B. beim Calder-Hall-Reaktor der Graphitzylinder auf Rollen gelagert, die Graphitblöcke in Richtung der Kanäle durch Nuten verbunden und der Mantel des Zylinders mit elastischen Bandagen versehen. [8, 20, 26]

engl.: graphite *franz.: graphite*

Lit.: L. D. Loch u. I. A. Sligh, Chem. Eng. Prog., Symposium Series, Bd. 50, Nr. 11, S. 39 (1954). – Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. 8, S. 451 ff., Vereinte Nationen, Genf, 1955.

Grashof-Zahl (Gr.). Die G. ist eine dimensionslose Kennzahl, die für den Wärmeübergang bei freier *Konvektion von Bedeutung ist. Ihre Definition ist

$$\mathrm{Gr} = \frac{g\,\beta\,\vartheta\,l^2}{\nu^2}$$

(s. Ähnlichkeitsgesetze). [5]
engl.: Grashof number
franz.: nombre de Grashof

Greinacher-Schaltung, svw. Stabilivolt-Schaltung, Anordnung zur Spannungsverdoppelung bei Wechselstrom. Sekundärseitig des Transformators werden zwei Kondensatoren und zwei Ventile derart angeordnet, daß bei positivem Durchgang der Spannung der eine Kondensator, bei negativem Durchgang der andere Kondensator über je ein Ventil aufgeladen wird, wobei die Röntgen-Röhre ihre Spannung lediglich noch von den Kondensatoren erhält. Die Röntgen-Röhre wird somit nur vom Ladungsvorrat der Kondensatoren gespeist. S. a. Gleichrichter und Kaskadenschaltung. [28]
engl.: Greinacher doubling circuit
franz.: montage doubleur de tension de Greinacher

Grenoble. Standort des zweiten (neuen) Atomforschungszentrums des französischen Atomenergiekommissariats. [24]

Grenze, extrapolierte. Durch die Oberfläche eines Mediums, in dem Neutronen diffundieren, geht ein Strom von Neutronen in die angrenzende Luft (Vakuum), während in der umgekehrten Richtung kein Strom fließt. Die Bedingung dafür lautet bei einer ebenen Grenzschicht nach der elementaren Diffusionstheorie

$$\frac{\Phi(x_0)}{4} + \frac{\lambda_t}{6}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) = 0 \qquad (1)$$

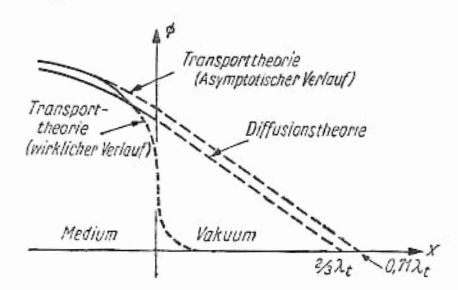
(λ_t Transportweglänge, Φ Neutronenfluß, proportional zur Neutronendichte). Einem endlichen $(\partial\Phi/\partial x)_{x=x_0}$ steht also ein $\Phi(x_0) \neq 0$ zur Seite. Wenn man die Neigung von Φ linear extrapoliert, so würde der Fluß Φ

Grenze, extrapolierte

an einer Stelle $x_0 + d$ verschwinden, wobei d gegeben ist durch

$$d = \frac{2}{3} \lambda_t \tag{2}$$

(s. Abb.). Um diese Strecke wird also die Grenze jenes Bereiches, in dem ein von 0 verschiedener Fluß herrscht,



hinausgeschoben, gemessen von der materiellen Grenze (Reaktor + Reflektor) an. d heißt Extrapolationsstrecke oder e. G. des betreffenden Mediums.

Der in (2) mit Hilfe der elementaren Diffusionstheorie angegebene Zahlwert wird durch die Transporttheorie genauer berechnet. Mit deren Hilfe findet man, wieder für eine ebene Grenzschicht,

$$d = 0{,}71 \lambda_t \tag{2 a}$$

Für einen Stab mit einem Radius $\varrho \ll \lambda_t$ folgt

$$d = \frac{4}{3} \lambda_t . \tag{3}$$

Die mit Hilfe der e. G. angegebenen Verläufe von Φ entsprechen in einer Umgebung von $2 \ldots 3 \lambda_t$ Dicke um die Grenze nicht den wahren Flußverläufen. Das Verfahren dient lediglich dazu, mit Hilfe einer einfachen Rechnung – der Diffusionstheorie – den wahren Flußverlauf in dem größeren Teil des Mediums bestmöglich zu approximieren. [7]

engl.: extrapolated boundary, extrapolation distance
franz.: distance d'extrapolation, longueur d'extrapolation

Grenzfrequenz, Frequenzwert, bei dem eine charakteristische Änderung der wirksamen Übertragungseigenschaften, insbes. des Frequenzganges eines Übertragers eintritt. Die G. tritt besonders deutlich in der logarithmischen Darstellung des Frequenzganges in Erscheinung, wo sie durch eine relativ scharfe Krümmung in dem sonst glatten Verlauf kenntlich wird. Die so ermittelte G. ist eng mit den sog. Zeitkonstanten in den anderen Darstellungen der Übertragungsfunktion, Differentialgleichung oder Übergangsfunktion verknüpft. Ein typisches Beispiel dazu ist die *Verzögerungszeitkonstante. Die wichtigsten G.n im Frequenzgang eines R e a k t o r s liegen, mit steigender Frequenz, an folgenden Stellen: Einsetzen der Temperaturverzögerung, Ende der Wirkung des Temperatureffektes, Einsetzen der Wirkung der verzögerten Neutronen, Ende d. Wirkung d. verzögerten Neutronen. [9]
engl.: break frequency *franz.: fréquence limite*
Lit.: Allgemein: W. Oppelt, Kleines Handbuch Technischer Regelvorgänge, Verl. Chemie, Weinheim, 1956. – Reaktor: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw-Hill, New York, 1955.

Grenzleistung, äußerster Wert der im Dauerbetrieb zulässigen Leistung eines Reaktors. Der Zahlwert für die G. ergibt sich entweder a) direkt aus der Leistung bzw. dem dazu proportionalen Neutronenfluß oder b) aus den bei Vollkühlung damit verbundenen Temperatursteigerungen im Kühlmittel, Brennstoff oder Moderator.
Fall a) kommt vorwiegend in Frage bei: experimentellen Reaktoraufbauten mit relativ geringer Strahlenabschirmung, Siedewasserreaktoren mit begrenzter Dampfkapazität, Wasserkesselreaktoren mit begrenzter Rekombinationseinrichtung, organischen Kühlmitteln mit begrenzter Strahlenfestigkeit u. dgl. Im allgemeinen überwiegt jedoch die Bedingung b). Dabei sind für Reaktoren mit natürlichem Brennstoff vor allem die inneren Temperaturerhöhungen im Brennstoffelement bzw. im Moderator von besonderer Bedeutung. Bei Reaktoren mit angereichertem Brennstoff und dementsprechend dünnen Brennstoffelementen ist dagegen die Empfindlichkeit des Hüllenmaterials gegen hohe Temperaturen und Oberflächenkorrosion ebenso wich-

tig. Man beachte, daß es sich bei a) vorwiegend um integrale Effekte für den gesamten Reaktor, bei b) dagegen um lokale Temperatur- bzw. Leistungsgrenzen handelt. [9]

engl.: power limit, power margin

franz.: puissance maximax

Lit.: The Reactor Handbook, Vol. 2, Engineering, McGraw-Hill, New York, 1955.

Grenzperiode, minimaler Grenzwert der Periode, der zur Vermeidung von gefährlichen Temperaturüberschlägen unter keinen Umständen unterschritten werden darf. Die G. ist zunächst nur für den Leistungsdurchgang durch die Grenzleistung bzw. eine nahe darunter liegende Abschaltleistung definiert. Ihr Zahlwert hängt stark von der Höhe der zulässigen Temperaturüberschläge über den Abschaltpegel, ferner von der Größe der Abschalt- und Temperaturverzögerung und dem Mitwirken evtl. Temperaturabschaltungen ab. Die zulässigen Zahlen liegen etwa zwischen 0,1 s und 1 s. Welche G. bei niedrigeren Leistungen festzusetzen ist, hängt von der Art der möglichen Leistungsänderungen ab und könnte im Prinzip durch eine Funktion zwischen beiden Größen ausgedrückt werden. Wegen der technischen Schwierigkeiten bei der Realisierung eines entsprechenden Sicherheitssystems und wegen der fast nie auszuschließenden Möglichkeit monoton immer weiter abnehmender Perioden schreibt man im allgemeinen den Wert der G. bei Vollast auch für alle niedrigeren Leistungen vor. Bei den genannten G.-Werten besteht eine relativ große Empfindlichkeit der Periode gegenüber Reaktivitätsänderungen. Es empfiehlt sich deshalb, für die Startperiode wesentlich größere Werte festzusetzen. Die Zahlen liegen hier zwischen etwa 1 und 30 s. [9]

engl.: period limit *franz.: période limite*

Grenzschalter, in der Reaktortechnik vor allem bei den Steuer- und Regelorganen benötigte Schaltgeräte zur Meldung bestimmter ausgezeichneter Steuerstellungen. Wichtige Anwendungsbeispiele sind: Umschaltungen bei der Trimmnachfolgesteuerung, Abschuß- und Bereitschaftsmeldung der Abschaltstäbe, Stellungsanzeige der Neutronendetektoren u. dgl.

Die G. sind zumeist einfache elektromechanische Schalter, deren Form und Ausführung durch die jeweilige Konstruktion bedingt ist. Gelegentlich werden mit Rücksicht auf physikalisch-chemische Bedingungen auch andere mehr indirekte Verfahren angewandt, z. B. hydraulische, pneumatische oder induktive Stellungsanzeigen bei Abschaltstäben, wenn direkte G. aus Strahlungsgründen oder wegen hermetisch abschließender Trennrohre zwischen Abschaltstab und übriger Konstruktion nicht in Frage kommen. [9]

engl.: limit switch   *franz.: indicateur de position*

Lit.: G. E. Lockett, Proc. of the Inst. of El. Eng., Vol. 103, B, 597, 1956.

Grenzstrahlen sind ganz weiche R ö n t g e n - Strahlen, die mit einer Spannung von 6 bis 12 kV erzeugt werden. Sie haben eine kürzeste Wellenlänge von etwa 1,7 Å und ein Wellenlängenmittel von 20 Å. Bei einem Spannungsmaximum von 200 kV beträgt die Grenzwellenlänge 0,062 und das Wellenlängenmittel bei kräftiger Filterung 0,11 Å. In der menschlichen Haut wird die Grenzstrahlung schon in den obersten Schichten (bis etwa 2 mm Tiefe) zum größten Teil absorbiert. [28]

engl.: grenz-rays

franz.: rayons de Bucky, rayons X mous

Grenztemperatur, maximale Dauertemperatur, bei der unter den gegebenen Betriebsbedingungen eine ernsthafte Schädigung des betreffenden Materials gerade noch nicht eintritt. Für die G. sind im allgemeinen folgende Effekte maßgeblich: a) Volumen- und Formänderungen bei Phasenumwandlungen der Metallstruktur, vorwiegend wichtig bei dicken Brennstoffstücken in Reaktoren mit natürlichem Brennstoff; b) Verminderung der Elastizität und bleibende Verformungen, z. B. bei nicht aufgelöteten Schutzhüllen um den Brennstoff oder bei stark belasteten Konstruktionsteilen der Reaktorstruktur; c) unzulässige Steigerung der Oberflächenkorrosion, z. B. bei glühendem Kohlenstoff und Kohlensäuregas oder bei Aluminiumhüllen in siedendem Wasser; d) Zersetzung oder Polymerisation des Kühlmittels, z. B. Dissoziation von Molekülgasen, Eindickung organischer Flüssigkeiten;

e) Abnahme des Wärmeübertragungsvermögens, z. B. durch Abhebung zwischen Schutzhülle und Brennstoff oder Bildung isolierender Dampfschichten an der Hüllenoberfläche. Welches dieser Kriterien letztlich für die G. entscheidend ist, hängt stark von der speziellen Reaktorstruktur ab und ist daher von Fall zu Fall verschieden. [9]

engl.: temperature limit *franz.: température limite*

Lit.: The Reactor Handbook, Vol. 2, Engineering; Vol. 3, Materials, McGraw-Hill, New York, 1955.

Grenzwertgerät, bei der Reaktorüberwachung häufig benutztes Meß- und Schaltgerät zur automatischen elektromechanischen Anzeige von Über- bzw. Unterschreitungen bestimmter Grenzmeßwerte. Die G.e werden vor allem in den Meßkanälen des Sicherheitssystems zur automatischen Auslösung von Sicherheitsoperationen eingesetzt.

Das Ausgangssignal besteht entweder in der Umschaltung elektrischer Kontakte oder in bestimmten vorgegebenen Spannungs- bzw. Stromsprüngen. Die Auslösung erfolgt im allgemeinen durch empfindliche elektronische oder elektromechanische Relais im Brükkenzweig einer Kompensationsmeßschaltung zwischen dem Meßwert und dem vorgegebenen Grenzwert. Zur Vereinheitlichung werden dabei nach Möglichkeit alle Meßwerte vorher durch geeignete Meßwandler auf den gleichen Amplitudenbereich transformiert, so daß nur eine bestimmte Sorte von G.n erforderlich ist. S. a. Auktionsschaltung, Zwei-von-Drei-system, Koinzidenzschaltung. [9]

engl.: amplitude sensitive relay

franz.: indicateur de dépassement

Lit.: A. B. Gillespie, Proc. of The Inst. of El. Eng., Vol. 103, B, 564, 1956.

Grobsteuerung, kontinuierliche oder schrittweise, reversible Steuerung der Reaktivität mit besonderen *Steuerorganen zum groben Ausgleich größerer Reaktivitätsänderungen im laufenden Reaktorbetrieb. Der Hub ist mindestens gleich der maximalen Reaktivitätsänderung und die Einstellgenauigkeit mindestens gleich dem halben Hub des *Regelorgans. Die G. ist im allgemeinen identisch mit der *Trimmung. [9]

engl.: coarse control *franz.: réglage grossier*

Größe, kritische, eines Reaktors nennt man die Abmessungen der Spaltzone eines Reaktors, bei der dieser unter Berücksichtigung eines vorgegebenen Reflektors und eines eventuell vorhandenen Brutraums kritisch wird. [7]
engl.: critical size *franz.: taille critique*

Grundlast. Bei Elektrizitätswerken eine *Last, die normalerweise im Betrieb nicht unterschritten wird. [24]

Grundlastkraftwerk. Ein Elektrizitätswerk, das zur Aufnahme einer möglichst gleichbleibenden *Last bestimmt ist (*Grundlast). Wegen des guten, nur geringen Schwankungen unterliegenden *Ausnützungsfaktors im Betrieb besonders wirtschaftlich. Atomkraftwerke werden wegen ihrer verhältnismäßig hohen Investitions- (Faktor 3) und niedrigen Betriebs- (vor allem Brennstoff-) Kosten wirtschaftlich als G. eingesetzt werden müssen. (Vgl. auch *Spitzenkraftwerk.) [24]

Grundterm, das Energieniveau des Grundzustandes eines atomaren oder nuklearen Systems. Der G. kann einem S-Zustand entsprechen, ebenso aber auch einem P-, D- usw. Zustand. Das erstere ist der Fall beim Wasserstoffatom, allen Alkaliatomen und allen Edelgasatomen. Bei den Halogenatomen treten P-Zustände auf. [1]
engl.: ground level
franz.: terme fondamental

Grundverfahren. Die große Vielfalt der Herstellungsprozesse in der Verbrauchsgüterindustrie jeder Art, auch der Prozesse der Kernspaltung, lassen sich durch physikalische Betrachtungsweise auf eine Reihe von G. zurückführen, die im Prinzip immer wiederkehren. Neben mechanischen Verfahren zeichnet sich dabei die Gruppe derjenigen Prozesse ab, bei denen es sich vorzugsweise um die Thermodynamik der Mehrstoffsysteme unter Änderung des Aggregatzustandes handelt. Es dreht sich dabei wesentlich um den Wärme- und Stoffaustausch, um die Hydrodynamik und um die Grenzflächenerscheinungen. Ihre einheitliche Behand-

lung ist die Aufgabe der *Verfahrenstechnik und die Basis der physikalischen Betrachtung der G. Eine gebräuchliche Systematik der G. sieht etwa folgende Einteilung vor:

A. Mechanische Stofftrennung:
1. Zerkleinern (Mahlen, Zerstäuben)
2. Klassieren, Sieben, Sichten
3. Filtrieren
4. Zentrifugieren
5. Scheidung in mechanischen und elektrischen Feldern

B. Thermische Stofftrennung:
1. Trocknen
2. Verdampfen
3. Destillieren und Rektifizieren
4. Solventextraktion
5. Kristallisieren
6. Sublimieren
7. Diffusion, Thermodiffusion

C. Stoffvereinigung:
1. Mischen
2. Absorbieren
3. Lösen, Emulgieren

Wie jede Systematik, so tut auch diese dem Stoff hier und da Zwang an. Deswegen vermag eine Systematik, die sich z. B. auf Phasensysteme stützt, jedenfalls kaum mehr zu leisten. [2]

engl.: unit operations

franz.: opération standard

Lit.: S. Kießkalt, Verfahrenstechnik, 1952.

Grundzustand. Der stationäre Zustand eines atomaren Systems mit der niedrigsten Energie. Im G. befindet sich das Atom, Molekül oder der Kern normalerweise, d. h. solange ihm nicht soviel Energie zugeführt wird, daß es auf ein höheres Energieniveau, in einen angeregten Zustand (s. Anregung) übergehen kann. Auch bei Kernen gibt es einen G. und angeregte Zustände. [1]

engl.: ground state

franz.: terme fondamental, état fondamental, état normal

Gruppendiffusionsmethode

Gruppendiffusionsmethode. Zur Beschreibung der Diffusion der Neutronen im Reaktor wird der Bereich von der Spaltenergie bis zur thermischen Energie in mehrere Intervalle ΔE_i unterteilt. In jedem dieser Intervalle werden die Wirkungsquerschnitte konstant angenommen (gewogene Mittelwerte, s. Gruppenkonstanten). Innerhalb des Intervalls diffundieren die Neutronen ohne Energieverlust, bis sie die Zahl von Stößen Z_i erlitten haben, die im Mittel für ein Durchqueren des Energieintervalls ΔE_i erforderlich sind. Dann kommen sie in das nächst-niedrigere Intervall. Dabei wird ihre Energie sprungartig verändert. Die Neutronen innerhalb eines Intervalls bezeichnet man als Neutronengruppe. Die Diffusionsgleichung für jede einzelne Gruppe weist also Quellen, d. h. den Zuwachs aus der oberen Gruppe, und Senken, d. h. Verlust an die untere Gruppe, auf. Die Senken schreibt man gewöhnlich in der Form einer Absorption, die physikalisch keine Neutronenablagerung an einen Kern, sondern einen Verlust an Energie infolge Bremsung darstellt (s. unten). Bei der obersten Gruppe bestehen die Quellen in den Spaltneutronen, bei der untersten Gruppe die Senken in einer echten Absorption.

Die Zweigruppentheorie wird am meisten benutzt. Hier umfaßt die erste Gruppe alle schnellen, die zweite die thermischen Neutronen. Die Grenze zwischen beiden liegt bei der Energie, bei der der thermische Fluß den schnellen Fluß schneidet. Der thermische Fluß verteilt sich über die Energieachse gemäß einer Maxwell-Kurve. Der schnelle Fluß ist im wesentlichen proportional $1/E$. Die relativen Höhen der beiden Flüsse richten sich nach Absorptions-, Streu- und Bremseigenschaften. Die Anschlußstelle ist trotzdem hiervon nicht empfindlich abhängig. Sie liegt für thermische Reaktoren bei 0,17 eV (s. Abb. bei Fluß).

Die Diffusionsgleichungen bei stationärem Betrieb lauten

für den Innenraum:

$$D_1^{(i)} \Delta \Phi_1^{(i)} - \Sigma_1^{(i)} \Phi_1^{(i)} + k \cdot \Sigma_{a2}^{(i)} \Phi_2^{(i)} = 0 \quad (1)$$

$$D_2^{(i)} \Delta \Phi_2^{(i)} - \Sigma_{a2}^{(i)} \Phi_2^{(i)} + p - \Sigma_1^{(i)} \cdot \Phi_1^{(i)} = 0 \quad (2)$$

für den Reflektor:

$$D_1^{(r)}\,\Delta\,\Phi_1^{(r)} - \Sigma_1^{(r)}\,\Phi_1^{(r)} = 0 \quad (3)$$

$$D_2^{(r)}\,\Delta\,\Phi_2^{(r)} - \Sigma_{a2}^{(r)}\,\Phi_2^{(r)} + \Sigma_1^{(r)}\cdot\Phi_1^{(r)} = 0 \quad (4)$$

Hierbei ist angenommen, daß sich im Reflektor kein spaltbares Material befindet. Die Größen $\Sigma_{a2}\,\Phi_2$ sind echte Absorptionen, die Größen $\Sigma_1 \cdot \Phi_1$ Bremsverluste.
p = *Bremsnutzung. [7]
engl.: group diffusion method
franz.: méthode des groupes de diffusion
Lit.: s. Fluß.

Gruppenkonstanten heißen die Faktoren in den Differentialgleichungen, die nach der *Gruppendiffusionsmethode zur Beschreibung der Neutronendiffusion im Reaktor benötigt werden. Da sich die Neutronengruppen stets über einen größeren Energiebereich ausdehnen, muß man die Diffusionskonstanten, Absorptions- und Bremsquerschnitte über diesen Bereich mitteln. Bei einer Zweigruppentheorie gilt für die schnelle Gruppe
der Diffusionskoeffizient

$$D_1 = \frac{1}{\Phi_1}\int\limits_{0{,}17\ \text{eV}}^{E_f} D(E)\cdot\Phi(E)\,\mathrm{d}E\,,$$

der Bremsquerschnitt

$$\Sigma_1 = \frac{1}{1/\xi\cdot\ln E_f/0{,}17}\cdot\frac{1}{\Phi_1}\cdot\int\limits_{0{,}17\ \text{eV}}^{E_f}\Sigma_s(E)\cdot\Phi(E)\,\mathrm{d}E\,.$$

Dabei bedeuten: $\Phi_1 = \int\limits_{0{,}17\ \text{eV}}^{E_f}\Phi(E)\,\mathrm{d}E$,

E_f = Spaltenergie in eV,

ξ = durchschnittlicher logarithmischer Energieverlust pro Stoß $= \overline{\ln(E_{i+1}/E_i)}$.

Für die thermische Gruppe ist
der Diffusionskoeffizient

$$D_2 = \frac{1}{\Phi_2}\int\limits_0^{0{,}17\ \text{eV}} D(E)\cdot\Phi(E)\cdot\mathrm{d}E\,,$$

der Absorptionsquerschnitt

$$\Sigma_{a2} = \frac{1}{\Phi_2} \int\limits_0^{0{,}17\,\mathrm{eV}} \Sigma_a(E) \cdot \Phi(E)\,\mathrm{d}E\,.$$

Dabei bedeutet $\Phi_2 = \int\limits_0^{0{,}17\,\mathrm{eV}} \Phi(E)\,\mathrm{d}E\,.$

Der Flußverlauf für $0{,}17 < E < E_f$ ist

$$\Phi(E) = \frac{Q \cdot p}{\xi \cdot (\Sigma_s + \Sigma_a)\mathrm{E}}$$

(Q Quellstärke, p Bremsnutzung), für $E < 0{,}17$ eV gilt die Maxwell-Verteilung

$$\Phi(E) = \frac{2\pi\,\Phi_2}{(\pi\,k\,T)^{3/2}} \cdot \sqrt{E} \cdot \mathrm{e}^{-E/k\,T}\,.$$

Die Wirkungsquerschnitte sind großenteils in Funktion der Energie gemessen. Ihre Werte sind in Tabellenwerken zusammengestellt. [7]

engl.: group constants

franz.: constantes de groupe

Lit.: D. I. Hughes, I. A. Harvey u. R. B. Schwartz, Neutron Cross Sections mit 1 Add., Verlag McGraw-Hill, New York, 1955/56. – S. Glasstone u. M. C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, McMillan, London, 1955.

GT, amerikanische Abk. für die Menge (Gramm pro Tonne) an spaltbarem Material, das in einem Brutreaktor (Konverterreaktor) neu entstanden ist. Sie ist von der Zeit abhängig. [22]

GTR. Abk. für Ground Test Reactor. Versuchs- und Prüfreaktor des Programms der US-Luftwaffe zur Entwicklung eines Atomantriebs für Flugzeuge. Seit 1953 in Betrieb in Forth Worth, Texas (USA). Gebaut von Convair. [24]

gu-Kerne, s. Kern.

engl.: even-odd nuclei

franz.: noyau pair-impair

Gummit. Sekundäres Uranmineral, rötlichgelb bis dunkelrot, mit 60 bis 75 % U_3O_8-Gehalt. [24]

Gußeisen. Unter G. versteht man Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit mehr als 1,7 % Kohlenstoff, deren Formgebung überwiegend durch Vergießen und durch

spanabhebende Bearbeitung erfolgt. In besonderen Fällen ist auch Warmverformung (zwischen 750 °C und 1050 °C) möglich. Meist enthält G. neben 2–4 % Kohlenstoff noch 0,3–3 % Silizium und 0,3–1,2 % Mangan. Ist der Kohlenstoff überwiegend in Form von Eisenkarbid Fe_3C gebunden, so erhält man das spröde weiße Gußeisen. Liegt der Kohlenstoff elementar, d. h. als Graphit, vor, so erhält man das graue Gußeisen (Grauguß), welches gut spanabhebend zu bearbeiten ist und in der Technik vielfache Anwendung findet. Im allgemeinen Fall liegt der Graphit in Form von Blättchen vor; unter besonderen Bedingungen, z. B. bei geeigneter Behandlung der Schmelze mit Magnesium, kann der Graphit auch in kugeliger Gestalt (Kugelgraphit) auftreten. Das G. erhält dadurch sehr hohe Festigkeitswerte. [4]
engl.: cast iron
franz.: fonte

Lit.: E. Piwowarsky, Hochwertiges Gußeisen, 2. Aufl., Springer, Berlin, 1951. – Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, 3. Aufl., Stahleisen, Düsseldorf, 1953.

Gußhaut. Dünne Oberflächenschicht bei gegossenen Werkstücken, die hauptsächlich aus Oxyden besteht. Die Oberflächen von Sandgußstücken sind mehr oder weniger rauh körnig, wogegen Kokillen- und Druckgußstücke eine verhältnismäßig glatte Oberfläche haben. Die G. wird vor der Weiterverarbeitung meist mechanisch entfernt. [4]
engl.: casting skin
franz.: croûte de moulage, peau d'oxyde

GW. Abk. für *Gigawatt. [24]

G-Wert. Bei der Bestrahlung einer Verbindung mit ionisierender Strahlung treten Abspaltungen bestimmter Atome oder Atomgruppierungen ein. Ein Maß für den Umsatz gibt die 100 eV-Ausbeute (G-Wert), d. h. die Zahl von Atomen, Molekülen oder Ionen, die pro 100 eV absorbierter Energie aus einem System abgeschieden oder in einem System umgesetzt werden.
$G(Fe^{3+}) = 15,5$ bedeutet, daß in einem wäßrigen System 15,5 Eisen-III-Ionen durch obige Energieabsorption gebildet werden; G_{H_2} (Hexan) bedeutet die Zahl der Wasserstoffmolekeln bei der strahlenchemischen Umsetzung von Hexan. Der G-Wert ist von der Struk-

tur einer Verbindung, dem Oxadationspotential, von dem System (wäßrig oder organisch) und in vielen Fällen von der Ionisationsdichte der Strahlung abhängig. [18]

engl.: G-value *franz.: valeur (de) g*

GWh. Abk. für Gigawattstunde. *Gigawatt. [24]

Gyrationsradius, der Radius einer Kreisbahn, die von einem elektrisch geladenen Teilchen (Ion, Elektron) unter dem Einfluß eines Magnetfeldes durchlaufen wird. Dabei wird vorausgesetzt, daß die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ verschwindet und die magnetische Feldstärke $\mathfrak{B}$ räumlich und zeitlich konstant ist. Zur Definition des G. a wird die zu $\mathfrak{B}$ senkrechte Geschwindigkeitskomponente $v_\perp$ verwendet. Man hat

$$a = v_\perp / \omega_c = m\, v\, c / Z\, e\, B\,.$$

Dabei ist ω_c die *Zyklotronfrequenz

$$\omega_c = Z\, e\, B / m\, c\,.$$

e/c ist die Ladung eines Elektrons in e. m. E., die Ladung des Teilchens ist somit $Z\, e/c$, seine Masse ist m. [27]

engl.: radius of gyration

franz.: rayon de gyration

Lit.: L. Spitzer jr., Physics of Fully Ionized Gases, Interscience Publ., New York, 1956. – T. G. Cowling, Magnetohydrodynamics, Interscience Publ., New York, 1957.

H

$\hbar = h/2\pi$ ist das *Planck sche Wirkungsquantum dividiert durch 2π (gesprochen: h quer). In den theoretischen Rechnungen ist die Größe $\hbar$ wesentlich praktischer als die ursprünglich von Planck eingeführte Konstante h, da fast immer nur der 2πte Teil in die Formeln eingeht, ähnlich wie die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi\nu$ in der mathematischen Darstellung sehr viel zweckmäßiger ist als die Frequenz ν. Man hätte also als Definitionsgleichung für die neue Naturkonstante statt $E = h \cdot \nu$ von vornherein besser $E = \hbar \cdot \omega$ gewählt (E Energie). [7]

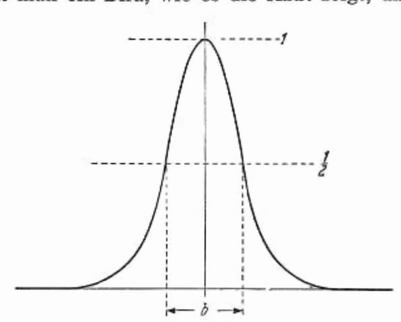
Häffnereffekt, s. Ionenwanderung.

engl.: Häffner effect *franz.: effet Häffner*

Hafnium (Hf)

Hafnium (Hf) ist ein Schwermetall mit der Dichte 11,4, Ordnungszahl 72, Atomgewicht 179, Schmelzpunkt etwa 1700 °C, Kristallstruktur: hexagonal dichteste Kugelpackung. Hf ist ein *Reaktorgift wegen seiner hohen Neutronenabsorption. Der thermische Absorptionsquerschnitt der natürlichen Isotopenmischung liegt bei $105 \cdot 10^{-24}$ cm². Zwischen 1 und 10 eV liegen Resonanzen, denen Absorptionsquerschnitte bis zu $10\,000 \cdot 10^{-24}$ cm² zukommen. Hf ist von dem für die Einhüllung von Uranstäben bestens geeigneten Zirkon nur schwer abzutrennen. [7]
engl.: hafnium
franz.: hafnium

Halbwertsbreite. Jede Spektrallinie besteht nicht nur aus Strahlung streng einer Frequenz, sondern hat eine gewisse Breite (in Frequenz- oder Wellenzahl-Einheiten gemessen). Nimmt man mit einem Spektralapparat genügend großer Dispersion die Intensitätsverteilung der Spektrallinie auf (Photometerkurve), so erhält man ein Bild, wie es die Abb. zeigt, und man



Definition der Halbwertsbreite b einer Spektrallinie

definiert nun als H. den Abstand (z. B. in Wellenzahl-Einheiten, cm $^{-1}$) der beiden Punkte der Photometerkurve, die rechts und links des Maximums gerade die halbe Intensität des Maximums haben. Manchmal wird auch die Hälfte dieses Abstandes als H. bezeichnet. S. a. Linienbreite. [1]
engl.: half width
franz.: largeur d'intensité moitié

Halbwertsdicke, die Dicke derjenigen Schicht eines Stoffes, die eine durchgehende Strahlung durch Absorption (s. Strahlungsabsorption) und Streuung auf die halbe Intensität schwächt. Folgt die Intensität I in Abhängigkeit vom Weg s einem Exponentialgesetz

$$I = I_0 \, e^{-\alpha s} ,$$

wie dies bei monochromatischen Wellenstrahlen weitgehend der Fall ist, so folgt aus

$$I = I_0/2 \text{ die H. } s_{1/2} = \ln 2/\alpha .$$

Die H. geht also umgekehrt proportional mit dem Schwächungskoeffizienten α (s. Absorptionskoeffizient). Bei Röntgen-Strahlen von 120 000 eV Quantenenergie ist z. B. die H. von Luft (760 mm, 0 °C) ca. 37 m, diejenige von Blei 0,17 mm, bei Röntgen-Strahlen von 3 MeV die H. von Blei 1,5 cm. Besonders bei sehr durchdringenden Strahlen, z. B. der kosmischen Strahlung, wird häufig zur ungefähren Charakterisierung der Durchdringungsfähigkeit die H. von Blei angegeben, auch wenn die Strahlung nicht genau einem exponentiellen Schwächungsgesetz folgt. [1]
engl.: half thickness
franz.: épaisseur d'intensité moitié

Halbwertschicht. Die H. ist diejenige Dicke eines Stoffes, die die Intensität einer einfallenden Strahlung genau um die Hälfte schwächt. Sie wird als Maß für die Strahlenqualität benutzt; je größer die H., um so größer die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung. Als Standardmaterialien gelten:

für Grenzstrahlung (5–20 kV) Cellon, Wasser oder Aluminium,
für weiche Strahlung (bis etwa 60 kV) Aluminium,
für mittelharte Strahlung (bis etwa 120 kV) Kupfer,
für harte Strahlung (bis etwa 250 kV) Kupfer,
für ultraharte Strahlung (bis über 250 kV) Blei oder Zinn.

Der Zahlenwert der H. ist sowohl von der Röhrenspannung (Maximum und zeitlicher Verlauf) als auch von den Schichten, durch die die Strahlung bereits hindurchgegangen ist, abhängig. [28]
engl.: half-value layer, half value thickness
franz.: couche de demi-absorption (demi-réduction)

Halbwertszeit, die Zeit, nach welcher nach dem exponentiellen Zerfallsgesetz des radioaktiven *Zerfalls eine ursprünglich vorhandene Anzahl radioaktiver Kerne zur Hälfte zerfallen ist. In der H. nimmt auch die Strahlung dieser Kerne auf die Hälfte ab. Die mit $1/\ln 2 = 1{,}443$ multiplizierte H. heißt mittlere Lebensdauer, da diese Zeit den Erwartungswert der noch verbleibenden „Lebenszeit" bis zum Zerfall eines radioaktiven Kerns darstellt.

Der reziproke Wert der Lebensdauer heißt Zerfallskonstante.

Die H. ist für jeden radioaktiven Kern eine charakteristische Konstante, die zu seiner sicheren Identifizierung dienen kann. Die bekannten H.n radioaktiver Kerne bewegen sich zwischen $0{,}3 \cdot 10^{-6}$ s beim Thorium C′ und $0{,}2 \cdot 10^{18}$ a beim Wismut. [1]

engl.: half-life *franz.: période*

Lit.: St. Meyer u. F. Schweidler, Radioaktivität, 2. Aufl., Teubner, Leipzig, 1927. – W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Halbwertszeit, biologische. Man versteht unter der b. H. diejenige Zeit (T_b) in Tagen, in der die Hälfte eines Radio-Isotops aus dem kritischen Organ durch biologische Prozesse ausgeschieden wird. Hierbei gilt:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

wobei I_1 die Intensität zur Zeit t (Zeitpunkt der Messung), I_0 die Anfangsintensität ist.

Für den Fall von $I_0/2 = I_0 \cdot e^{-\lambda t}$ (T_b biologische Halbwertszeit) ist

$$T_b = \frac{0{,}693}{\lambda} \quad \text{und} \quad \lambda = \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{t_2 - t_1}.$$

Bei Dauerzufuhr eines Radio-Isotops gilt:

$$T_b = \frac{0{,}693 \cdot m \cdot C}{I \cdot f_W (\text{bzw. } f_L)}$$

m Masse des kritischen Organs, C Wert für die Konzentration im kritischen Organ, I Wert für die durchschnittliche tägliche Aufnahme, f_W Wert für die Bruchteile, die bei Aufnahme durch die Nahrung, f_L Wert für die Bruchteile, die bei Aufnahme durch Atmung abgelagert werden. [28]

engl.: biologic half-life

franz.: période (de demi-désactivation) biologique

Halbwertszeit, effektive. Unter der e. H. versteht man die Beziehung

$$T_{eff} = \frac{T_b \cdot T_r}{T_b + T_r}$$

(T_r Halbwertszeit des radioaktiven Zerfalls, T_b biologische Halbwertszeit).
Bei Dauerzufuhr eines Radio-Isotops bestimmt die e. H. den Zeitpunkt, zu dem ein Gleichgewichtszustand im Körper eintritt, wobei unter diesem Zustand ein solcher zu verstehen ist, bei dem die Wochendosis im kritischen Organ unverändert 0,3 rem/Woche beträgt oder bei dem die je Zeiteinheit in das kritische Organ gelangende Menge eines radioaktiven Isotops exakt gleich der je Zeiteinheit durch radioaktiven Zerfall und biologische Ausscheidung wegfallende Menge ist. In den meisten Fällen wird dieser Zustand im Laufe weniger Wochen erreicht. [28]
engl.: effective half-life
franz.: période (de demi-désactivation, de demi-destruction) effective

Halex-Prozeß, Aufbereitungsprozeß vom Typ des TBP *Purex-Prozeß zur Aufbereitung neutronenbestrahlter angereicherter Uran-Kernbrennstoffe. Beide Prozesse unterscheiden sich dadurch, daß beim H.-P. das Extraktionsmittel TBP nicht in Kerosin, sondern in Tetrachlorkohlenstoff aufgelöst wird. Die flüssigen, wäßrigen Uransalzlösungen werden im Anschluß an den Extraktionsprozeß über Kieselgurfilter geleitet und nachgereinigt. [22]
engl.: Halex process *franz.: procédé Halex*

Halogenzählrohr. Ein *Zählrohr mit Argon- oder Neonfüllung, der einige Prozente Cl_2 oder Br_2 zugesetzt wurden um Selbstlöschung zu erreichen. H. besitzen praktisch keinen Proportionalbereich, haben eine längere Impulsanstiegszeit und werden infolge Aufzehrung des Halogenanteils im Füllgas nach 10^8 bis 10^{10} Impulsen unbrauchbar. Vorteile: Niedrige Betriebsspannung, Selbstlöschung, Temperaturunempfindlichkeit. [6]
engl.: halogen counter
franz.: compteur à halogénes

Halterungsmaterial im Reaktor, s. Strukturmaterial.

Hämatit, Eisenglanz, ist ein Mineral der Zusammensetzung Fe_2O_3 enthält 40 bis 65 % Eisen. Größtes H.-Lager findet sich am Oberen See in USA. [26]
engl.: hematite
franz.: hématite

Hamburger Forschungsreaktor, s. FRH.

Hand-Automatik-Schalter, Schalter auf dem Steuerpult in der Schaltwarte zum Umschalten von der automatischen Regelung bzw. dem automatischen Start auf die normale Handbedienung des Reaktors. [9]
engl.: hand automatic switch
franz.: commentation automatique-main

Handstart, von geschultem Bedienungspersonal mit Handschaltungen gesteuerter Start eines Reaktors. Erfordert wegen der langen Anlaufzeiten bei negativen Reaktivitäten und anschließenden schnellen Perioden und Leistungsänderungen erhebliche Erfahrung und Aufmerksamkeit. Zur Erleichterung dienen halb- und vollautomatische *Startsysteme. [9]
engl.: manual start-up
franz.: démarrage manuel

Hanford Engineering Works, Produktions- und Versuchsanlage der amerikanischen Atomenergiekommission (*AEC) bei Hanford, Wash., am Columbia-River. Errichtet ab 1943. Standort der ersten großen *Atomreaktoren zur Erzeugung von *Plutonium als *spaltbarem Material für das amerikanische Atombombenprojekt im 2. Weltkrieg. Wird heute für die AEC betrieben durch die General Electric Co. [24]

haploid, svw. den einfachen Chromosomensatz besitzend (s. Chromosomen). [28]
engl.: haploid
franz.: haploïde

Härte, ein Kennwert, der den Widerstand eines Werkstoffes gegen das Eindringen eines anderen, härteren Körpers in seine Oberfläche kennzeichnet. Bei den Meßmethoden nach *Brinell, *Vickers und *Rockwell, welche jeweils verschiedene Werte (gekennzeichnet durch HB, HV und HR) ergeben, wird die Größe eines Eindrucks, den ein Körper aus gehärtetem Stahl, *Hartmetall oder Diamant bei einer definierten Be-

lastung verursacht, gemessen. Bei der Ritzhärteprüfung wird die Breite eines aufgebrachten Ritzes mit der Belastung des Ritzdiamanten in Verbindung gesetzt. Daneben sind dynamische Härteprüfungen bekannt, wie z. B. die Fallhärteprüfung, wobei eine Kugel durch ein fallendes Gewicht in den Werkstoff eindringt, die Schlaghärteprüfung, wobei eine Kugel durch Federkraft in den Werkstoff eindringt und die Rücksprunghärteprüfung, wobei die Rücksprunghöhe eines Fallhammers gemessen wird. [4]
engl.: hardness *franz.: dureté*
Lit.: Din 51 200.

Härte einer Strahlung ist eine Bezeichnung, die zur qualitativen Kennzeichnung ihrer *Durchdringungsfähigkeit benutzt wird. Man unterscheidet z. B. je nach ihrer Energie harte und weiche β-Strahlung.
Ein Maß für die H. einer Strahlung ist die Halbwertschicht einer bestimmten Substanz (man wählt z. B. Aluminium für β-Strahler). Sie ist definiert als diejenige Schichtdicke, nach deren Durchlaufen die Strahlungsintensität auf die Hälfte abgesunken ist. [17]
engl.: hardness
franz.: dureté

Hartlöten, s. Löten.
engl.: brazing *franz.: braser*

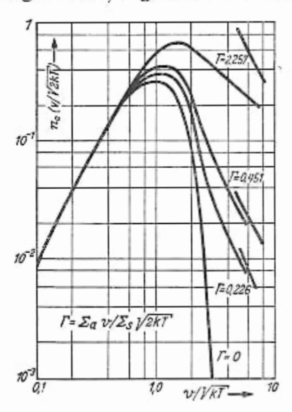
Hartmetall. Legierungen, welche aus Karbiden des Wolframs, Molybdäns, Chroms, Tantals, Vanadins oder Titans bestehen, die in eine zähe Grundmasse (z. B. Kobalt) eingebettet sind. Die Karbide sind der eigentliche Träger der Härte, welche erst bei Temperaturen über 1000° wesentlich abnimmt. Man unterscheidet zwei Gruppen von H.n, die Schneidmetalle, welche erschmolzen und gegossen werden (auch unter dem Namen Stellit bekannt) und die Karbidhartmetalle (auch als Widia bekannt), welche *pulvermetallurgisch hergestellt werden. Auf Grund ihrer großen *Warmfestigkeit lassen sich mit Schneidwerkzeugen aus H. hohe Schnittleistungen erzielen. [4]
engl.: cutting metal, cemented metal carbide
franz.: métal dur
Lit.: F. Kieffer u. P. Schwarzkopf, Hartstoffe und Hartmetalle, Springer, Wien, 1950.

Hartstrahltechnik. Harte (kurzwellige) R ö n t g e n - Strahlen werden beim Durchtritt durch die Materie weniger geschwächt als weiche (langwellige) Strahlen. Dieses Verhalten nützt man bei R ö n t g e n - Aufnahmen aus, indem man mitunter gerade die harten Strahlen zur Aufnahme benutzt. Die Vorteile liegen darin, daß durch besonders kurze Belichtungszeiten die Bewegungsunschärfe nahezu völlig ausgeschaltet werden kann, und daß die Strahlenbelastung für den Patienten sehr viel kleiner ist, was bei häufigen Kontrollaufnahmen ins Gewicht fällt. Die Nachteile liegen in dem geringeren Kontrast der Objekte und in einer Schleierbildung durch den höheren Streustrahlenanteil. [28]

engl.: hard-ray-technique

franz.: radiographie à très haute tension, technique des rayons durs

Härtung des Neutronenspektrums. Neutronen, die mit dem Moderator im thermischen Gleichgewicht stehen, haben eine Maxwellsche Energieverteilung, welche durch eine von der Moderatortemperatur abhängige mittlere Energie $3\,k\,T/2$ gekennzeichnet ist. Ist der



Moderator ein Absorber, so tritt eine Verzerrung der Energieverteilung ein. Da (z. B. beim $1/v$-Absorber) Neutronen mit geringerer Energie bevorzugt absorbiert werden, tritt eine Verarmung der langsameren Neu-

tronenkomponente ein. Diesen Effekt nennt man H.d.N. Er muß insbesondere bei wasserstoffhaltigen Medien berücksichtigt werden. Die Abb. zeigt nach Wigner und Wilkins die H. d. N. in Wasserstoff.
Die H. d. N. kann dadurch berücksichtigt werden, daß man die mittlere Neutronengeschwindigkeit mit dem Faktor

$$1 + 1{,}2\, \Sigma_a (k\,T) / \xi\, \Sigma_s$$

korrigiert (Σ_a Absorptionsquerschnitt, Σ_s Streuquerschnitt, ξ mittlerer logarithmischer Energieverlust pro Stoß). Dies läuft darauf hinaus, daß man die Energieverteilung zwar wieder durch eine Maxwell-Verteilung beschreibt, jedoch eine andere Moderatortemperatur als die tatsächliche einsetzt. Diese Korrektur liegt in der Größenordnung von + 50 °C. [13]
engl.: hardening
franz.: durcissement du spectre de neutrons
Lit.: Reactor Handbook, Vol. I, Physics, S. 375 (AECD-3645), McGraw-Hill, New York, 1955.

Harwell. Atomenergie-Forschungsinstitut der britischen Atomenergiebehörde (*AEA) bei Didcot, Grafschaft Berkshire. Zuständig für Grundlagenforschung auf allen Gebieten der Atomenergie und Entwicklung, insbesondere für Stromerzeugung aus Atomenergie einschl. Reaktorentwicklung, Spezialstoffe etc. Beratung der Waffen- und Industriegruppen der AEA. Erzeugung und Verkauf von *radioaktiven Isotopen. Besitzt zur Zeit neun in Betrieb befindliche *Forschungs- und *Versuchsreaktoren, Reaktorschule und Isotopenschule (auch für Ausländer), Zweiginstitut Radiochemical Center *Amersham, Spezialabteilung für industrielle Anwendung starker radioaktiver Strahlungsquellen *Wantage (in Entwicklung). Leitung: Sir John Cockcroft. [24]

Häufigkeitsverhältnis der Isotope. Prozentualer Anteil der Isotope in natürlich vorkommenden Elementen. [3]
engl.: abundance of isotopes
franz.: abondance des isotopes

H-D-Empfindlichkeit, s. Nachtrag.

Heisenberg-Kraft ist ein phänomenologischer Ansatz für die *Kernkraft. Sie ist eine Austauschkraft und

verkoppelt mit dem Austausch von Ladungen. Ausführlichere Darstellung s. Austausch. [7]
engl.: Heisenberg force
franz.: force de Heisenberg

heiß. Jene Räume, Materialien oder Teile einer Anlage, in denen eine so starke Radioaktivität herrscht, daß man sie nicht betreten bzw. an ihnen arbeiten kann, nennt man in übertragenem Sinne „heiß". Die Bezeichnung ist also synonym zu – planmäßig oder außerplanmäßig – radioaktiv verseucht. So spricht man z. B. von einem heißen Kühlkreislauf, wenn eine radioaktive Lösung umgepumpt wird, von heißen *Zellen, die bestrahlte, hochradioaktive Substanzen, insbesondere abgebrannte Brennstoffelemente aufnehmen. Die Aufarbeitung derartiger Stoffe, insbesondere Brennstoffelemente, die vollautomatisch vonstatten gehen muß, ist Aufgabe der heißen *Chemie. [7]
engl.: hot
franz.: chaud

Heißpressen, s. Drucksintern.
engl.: hot pressing
franz.: pressage à chaud

Heizflächenbelastung. Die Wärmemenge, die von einem Oberflächenstück der Größe eins in der Zeiteinheit abgegeben wird, nennt man H. oder Wärmestromdichte. Unter mittlerer H. in einem Reaktor versteht man das Verhältnis von Wärmeleistung zu gesamter Heizfläche (Oberfläche aller Brennstoffstäbe). [5]
engl.: heat velocity
franz.: charge (calorifique) superficielle

Heizkraftwerk. Eine *Wärmekraftanlage, in der der erzeugte Dampf zweifach ausgenützt wird: zunächst zur Erzeugung elektrischen Stroms, anschließend für Heizung. Ergibt bessere Wirtschaftlichkeit durch bessere Ausnutzung des verwendeten Brennstoffs (Kohle) und somit höheren *Wirkungsgrad als bei reinem Wärmekraftwerk und reinem Fernheizwerk allein. Erscheint grundsätzlich von besonderem Interesse auch für Anwendung der Atomenergie, besonders bei *Atomreaktor-Typen, bei denen der erzeugte Dampf ziemlich niedrige Temperaturen hat. [24]

Heliumalter ist das Alter eines radioaktiven Minerals, z. B. von Uran oder Thorium, das auf Grund seines Heliumgehalts berechnet ist. Das Helium entsteht beim α-Zerfall der Kerne. Die Art der Berechnung ist analog der der Bleimethode. S. Bleialter und Altersbestimmung, radioaktive. [7]
engl.: helium age *franz.: age d'hélium*

Heliumkern, s. Alphateilchen.
engl.: helium nucleus *franz.: noyau d'hélium*

Helium-Leckprüfung, hochempfindliche Methode der Leckfindung an geschlossenen Behältern, Rohren usw. Wichtig für die Dichtigkeitsprüfung von Rohren, die als *Hülse von Brennstoffelementen dienen sollen. Das zu prüfende Teil wird evakuiert und von außen mit Helium oder einem Helium-haltigen Gemisch besprüht. Das abgesaugte Gas wird durch einen Helium-Lecksucher geleitet, der bereits sehr geringe Mengen Helium auf massenspektroskopischem Wege nachzuweisen gestattet. Die Erkennungsgrenze für eine Undichtigkeit liegt bei 10^{-9} *Torr · Liter/s. [20]
engl.: helium leak detection
franz.: détection des fuites par l'hélium

Herddosis, Herdraumdosis, s. Dosis.

hermitisch oder s e l b s t a d j u n g i e r t heißt eine Matrix, wenn für die Elemente gilt: $a_{ik} = a^*_{ki}$; a^*_{ki} bedeutet konjugiert komplex zu a_{ki}. Im übertragenen Sinne spricht man auch von h.n Operatoren H, wenn gilt

$$\int [\psi^* \boldsymbol{H} \psi - \psi (\boldsymbol{H} \psi)^*] \, \mathrm{d}v = 0 .$$

dv zeigt die Integration über das von den unabhängigen Veränderlichen aufgespannte Volumen an. Die Operatoren können z. B. Matrizen sein. Dann gilt für die Elemente von $\boldsymbol{H}$ die oben erwähnte Beziehung. H kann aber auch einen Differentialoperator darstellen. ψ ist die Lösung der Operatorgleichung

$$\boldsymbol{H} \psi = -\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \psi}{\partial t} ,$$

bzw.

$$(\boldsymbol{H} \psi)^* = +\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \psi^*}{\partial t} .$$

[7]

engl.: self-adjoint *franz.: hermitique*

Hertz, Zahl der Schwingungen in der Sekunde. [7]

heterozygot, svw. gemischterbig, Gegensatz homozygot. [28]
engl.: heterozygous
franz.: hétérozygote

Heterozygotie, Zuchtergebnis aus dem Zusammentreffen zweier ungleicherbiger Keimzellen. [28]
engl.: heterocygoty
franz.: heterozygotie

HEW-305. Abk. für Hanford Engineering Works 305 Test Reactor. Von Du Pont gebauter, 1944 in Betrieb genommener kleiner *Forschungsreaktor (nat. U, graphitmoderiert) in der *Hanford-Anlage der *AEC, USA. [24]

Hexagonal, s. **Kristallstruktur.**
engl.: hexagonal
franz.: hexagonal

Hexon, amerikanische Abkürzung für das Extraktionsmittel Methylisobutylketon $CH_3COCH_2CH(CH_3)_2$. Es wird als Extraktionsmittel beim Trennungsprozeß von Uran und Plutonium von den Spaltprodukten aus einer wäßrigen Lösung angewandt. Als Salzzuschlag kommt $Al(NO_3)_2$ zur Anwendung, es wird ohne Verdünnungsmittel benutzt.
Molekulargewicht: 100,16
Dampfdruck bei 0 °C 4,42, bei 30 °C 26,19, bei 100 °C 468,3, bei 115,9 °C 760,0
Siedepunkt 115,9 °C
Gefrierpunkt − 80,26 °C
Dichte bei 0 °C 0,8126, bei 30 °C 0,7912
Refraktionsindex M_D^{20} 1,3958
Oberflächenspannung 25,4 (Dyn/cm)
Viskosität bei 0 °C 0,769, bei 30 °C 0,552 Centipoise
Verdampfungswärme 86,5 cal/g
Spezifische Wärme 0,459 cal/g
Grenzkonzentrationen für die Entflammung in Luft über 100 °C 8,0 %, unter 50 °C 1,34 %.
Löslichkeit von Hexon in Wasser bei 25 °C 2 %, Löslichkeit von Wasser in Hexon bei 25 °C 2,2 %.

Hexon ist feuergefährlich, ferner schwach toxisch (schleimhautreizend, narkotisierende Wirkung). [22]

Lit.: Bruce, Fletcher, Hyman, Katz, Progress in Nuclear Energy Series III, Process Chemistry, Bd. 1, Pergamon Pѫess, London, 1956.

Hexon-Prozeß, amerikanische Bezeichnung aller Extraktionsprozesse in der flüssigen Phase, bei denen *Hexon als Extraktionsmittel verwendet wird. Hexon ist ein bekanntes Extraktionsmittel für anorganische Salze, im besonderen für Nitrate. Im wäßrigen Hexonnitratsystem ist der Verteilungskoeffizient für Uranylnitrat zwischen der wäßrigen, nitrathaltigen Phase und der organischen Hexon-Phase eine Funktion der Nitrat- und Salpetersäurekonzentration in der wäßrigen Phase und zwar steigt der Verteilungskoeffizient für Uran mit wachsender Nitratkonzentration an. Plutonium kann im dreiwertigen Valenzzustand nicht durch Hexon extrahiert werden, im vierwertigen (IV) ist es schwach, im sechswertigen (VI) hingegen sehr gut extrahierbar. Plutonium läßt sich in Gegenwart von sechswertigem Uran durch schwache Reduktionsmittel ($Fe(SO_3NH_2)_2$) in die nicht extrahierbare dreiwertige Valenzform überführen, ohne daß dadurch das sechswertige Uran gleichfalls reduziert wird. Diesem Umstand hat man die Möglichkeit der Trennung von Uran und Plutonium zu verdanken. [22]
engl.: hexon process
franz.: procédé hexon

Heywood-Faktor, s. Körnung.

HIFAR, Abk. für High Flux Australian Reactor, den ersten australischen Forschungsreaktor. 10 000 kW *Materialprüfreaktor mit hohem Neutronenfluß vom Typ *DIDO, gebaut durch die britische Firma Head Wrightson Processes Ltd. in Lucas Height bei Sidney und in Betrieb seit 26. Jan. 1958. [24]

Hilfsmotor. Bei Atomkraftwerken muß die Funktionsfähigkeit wichtiger Maschinen unter allen Umständen gesichert sein. Dazu dienen Ersatz- und Hilfsmaschinen. Beim Kraftwerk Calder-Hall z. B., wurden bei den Kühlgasgebläsen batteriegespeiste Hilfsmotore mit angebaut, welche beim Ausfall der elektrischen

Stromversorgung die erforderliche Mindest-Kühlleistung erzeugen. [8]
engl.: pony motor, servo-motor
franz.: servo-moteur

Hinkley Point, brit. Reaktorstation mit verbesserten Calder-Hall-Typ-Reaktoren.

Hochstellen, Heraufsetzen des Sollwertes einer automatischen Regelung. Ersetzt bei vollautomatischen Startsystemen unter Umständen den echten Start. Gegenoperation Tiefstellen. [9]
engl.: set-up *franz.: montée en puissance*
Lit.: s. Abschalten.

Hochtemperatur-Reaktor. Bezeichnung für *Energiereaktor, bei dem das Wärmeübertragungsmittel auf Temperaturen erhitzt werden kann, die einen guten, den modernen Wärmekraftwerken nahekommenden *Wirkungsgrad ergeben. Bisher praktisch noch nicht erreicht, jedoch bei verschiedenen in Entwicklung befindlichen Reaktortypen angestrebt (z. B. gasgekühlter Reaktor mit keramischen Brennstoffelementen, mit flüssigem Metall gekühlter Reaktor usw.). [24]
engl.: high temperature reactor
franz.: réacteur à températures élévés

Hochvakuumschmelzen, wichtiger Schritt bei der Reindarstellung von Metallen, insbesondere von Uran. Dabei werden Verunreinigungen, hauptsächlich metallischer Art, aus der Schmelze herausgedampft. Durch das anschließende Gießen werden Schlackenreste vom Metall getrennt. Als Tiegelmaterial dient meist Graphit. Dadurch kann allerdings Kohlenstoff ins Metall gelangen und eine *Aufkohlung stattfinden, weshalb man den Tiegel häufig durch geeignete Oxyde auskleidet. [20]
engl.: high vacuum melting
franz.: fusion sous vide poussé

Hodoskop = Conversi-Zähler, besteht aus einem Stapel edelgasgefüllter, elektrodenloser Glasröhrchen von etwa 5 mm Durchmesser, die im Feld eines Plattenkondensators angeordnet sind. Durchquert ein energiereiches Teilchen die Anordnung, so wird ein durch Koinzidenz gesteuerter Hochspannungsstoß (Feld-

stärke $> 10^4$ V/cm) an den Kondensator gelegt, der die vom Teilchen durchquerten Röhrchen zum Aufleuchten bringt. Vorteil: großes empfindliches Volumen, gutes zeitliches und räumliches Auflösungsvermögen, Möglichkeit der photographischen Registrierung. [6]
Lit.: Conversi u. Gozzini, Nuovo Cim. 2, 189, 1955.

Höhenstrahlung, synonym für kosmische *Strahlung. [7]

Holtesche Methode, ein Verfahren zur Berechnung der Neutronenbremsung in speziellen, nichtabsorbierenden Medien. [13]
engl.: Holte's method
franz.: méthode de Holte
Lit.: B. Davison, Neutron Transport Theory, Clarendon Press, Oxford, 1957.

homozygot, svw. reinerbig, Gegensatz heterozygot. [28]
engl.: homozygous
franz.: homozygote

Homozygotie, Zuchtergebnis aus dem Zusammentreffen zweier gleichartiger Keimzellen, d. h. mit dem gleichen Gen-Bestand. [28]
engl.: homozygoty
franz.: homozygotie

Honeycomb. Bezeichnung für kleinen *Nullenergie-Versuchsreaktor im Los Alamos Scientific Laboratory der USAEC (Waffenentwicklung). [24]

HRE-1. Abk. für Homogeneous Reactor Experiment No. 1. Versuchsreaktor der USAEC vom Typ des homogenen, wässerigen Lösungsreaktors. Brennstoff und Moderator: Uranylsulfatlösung in Wasser, auf 90 % U-235-Gehalt angereichert, zugleich als Kühlmittel. Wärmeleistung 1000 kW, elektrische Leistung 140 kW. Kosten 4 Mill. $, davon 3 Mill. $ für Entwicklung. In Betrieb seit 1952, erste Stromerzeugung 24. 2. 1953, abgebaut 1954. Gebaut im Oak Ridge National Laboratory der USAEC.

Der Reaktor bestand aus einer rostfreien Stahlkugel von 45 cm Durchmesser, durch die die Lösung von angereicherten UO_2SO_4 in Wasser gepumpt wurde. In

einem äußeren Wärmetauscher konnten bis zu 1,6 MW Wärmeleistung abgegeben werden. Die Reaktorkugel war mit einem 25 cm dicken D_2O-Reflektor umgeben. Die bei der radiolytischen Zersetzung des Wassers gebildeten Gase wurden in einer besonderen Vorrichtung rekombiniert. Es zeigte sich, daß der homogene Wasserreaktor einen negativen Temperaturkoeffizienten von fast 10^{-4} pro °C aufweist, der zur Selbststabilisierung ausreicht. Der wichtigste Nachfolger des HRE ist der nach dem gleichen Prinzip, jedoch leistungsstärker ausgeführte *HRT (auch HRE-2). [13, 24]

HRE-2. Abk. für Homogeneous Reactor Experiment No. 2. Prototyp für *homogenen Leistungsreaktor. Brennstoff, Moderator und Kühlmittel: Uranylsulfatlösung in Schwerem Wasser, auf 90 % U-235-Gehalt angereichert. Elektrische Leistung 300 bis 1000 kW, Wärme 5 MW, Kosten ca. 3 Mill. $. In Betrieb seit 27. Dez. 1957 im Oak Ridge National Laboratory der USAEC. Betriebsunterbrechung im Frühjahr 1958. Beschreibung unter HRT. [24]

HRT (Homogenous Reactor Test), auch HRE-2, Weiterentwicklung des HRE-1.

Schon der HRE-1 hat die Vorteile des kleinen homogenen thermischen Reaktors klargestellt:

a) Der negative Temperaturkoeffizient ist so groß, daß der Reaktor sich selbst stabilisiert und seine Leistung nur vom Wärmeentzug abhängt. Kontrollstäbe sind überflüssig. Schnellschluß durch Ablassen der Füllung oder Konzentrationsänderung.

b) Die Zufuhr und Entnahme des Spaltstoffs ist einfach. Auch die gasförmigen und festen Spaltprodukte können kontinuierlich abgeführt werden, so daß die Überschußreaktivität nur klein sein braucht. Auch die parasitäre Absorption ist sehr klein. Aus diesem Grunde kann die kritische Masse klein gehalten werden und die spezifische Leistung ist hoch.

c) Die Wärmeübertragungseigenschaften sind gut. Ein beträchtlicher Teil der Wärmeproduktion erfolgt im Mantel.

d) Thermisches Brüten im Mantel ist möglich.

HRT (Homogenous Reactor Test)

Diesen Vorteilen stehen jedoch eine Reihe von Nachteilen gegenüber:

a) Die Brennstofflösung ist sehr korrosiv. Die Stabilität von Brutstoff-Suspensionen ist noch nicht sichergestellt. Maximaltemperatur bei 300 °C.
b) Der Außenkreislauf des hoch radioaktiven Brennstoffs erfordert besondere Dichtungs- und Abschirmungsmaßnahmen. Außerdem sind im Außenkreislauf beträchtliche Mengen von Spaltstoff (und ggf. D_2O) gebunden.
c) Die radiolytische Zersetzung des Moderators erfordert beim Leistungsreaktor umfangreiche und komplizierte Maßnahmen (Rekombinationssystem).
d) Die Aufarbeitung des Brennstoffs erfordert eine umfangreiche, mit dem Reaktor gekoppelte heiße Anlage. Dadurch hohe Betriebskosten.
e) Das System muß unter hohem Druck stehen.

Der HRT soll als Großversuch klären, inwieweit ein homogener Reaktor von kleinem Volumen als Leistungsreaktor verwendet werden kann. Insbesondere sollen die Fragen der Korrosion, der kontinuierlichen Entgiftung und Spaltstoffzufuhr geklärt werden. Gleichzeitig sollen die (thermischen) Bruteigenschaften dieses Reaktortyps untersucht werden.

Das Reaktorgefäß ist doppelwandig: eine Kugel von 80 cm Durchmesser aus Zirkalloy-2 nimmt den Brennstoff auf und wird von einer zweiten Kugel aus rostfreiem Stahl von etwa 1,5 m Durchmesser umgeben. (Wegen eines Lecks in der Zircalloy-Trennwand mußte der HRT bald nach dem Anlaufen zur Reparatur stillgelegt werden.) Der Zwischenraum dient als Reflektor- bzw. Brutmantel. Beide Gefäßteile haben eigene Rohranschlüsse. Der Brennstoff besteht aus 90 %ig angereichertem UO_2SO_4, gelöst in D_2O. Die kritische Masse beträgt 2,4 kg U^{235}, eingesetzt sind insgesamt 5,2 kg. Die Brennstofflösung enthält einen Kupferkatalysator, um der Radiolyse des Schwerwassers entgegenzuwirken. Der Mantel wird zunächst mit D_2O gefüllt. Später ist die Füllung mit einer Suspension von ThO_2 in D_2O vorgesehen, wodurch der HRT als thermischer Brüter

HRT (Homogenous Reactor Test)

wirkt. Bei einem thermischen Fluß von $7 \cdot 10^{13}$ und einem schnellen Fluß von $10^{14}\ \mathrm{cm^{-2}\,s^{-1}}$ wird in der Spaltzone eine Leistung von 5 MW, im Mantel von 0,22 MW produziert. Die spezifische Leistung beträgt

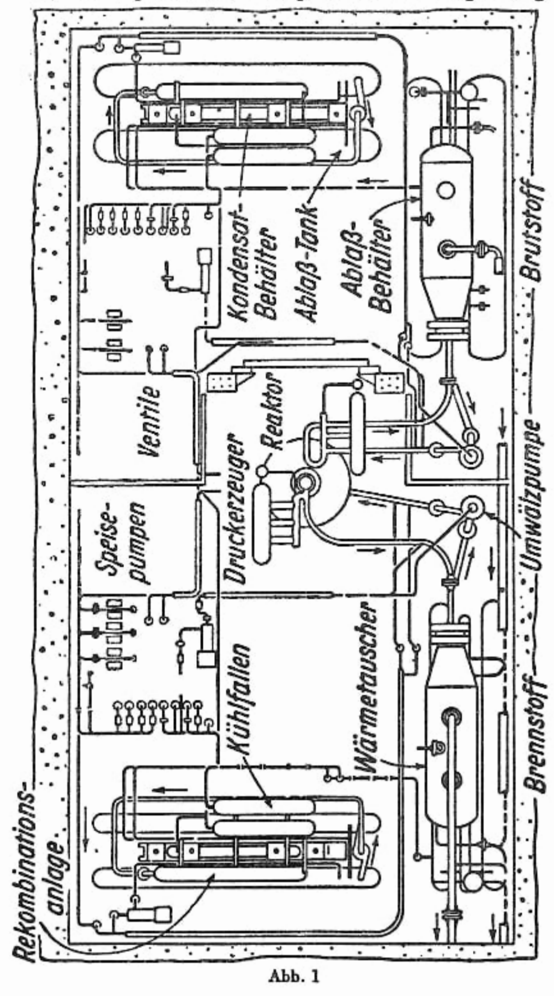


Abb. 1

rund 1 MW/kg, die Leistungsdichte 17 kW/l. Die Primärkreise von Spaltzone und Mantel stehen unter einem Druck von 141 at, um Sieden des Reaktorinhalts zu vermeiden. Der Inhalt der Spaltzone wird

HRT (Homogenous Reactor Test)

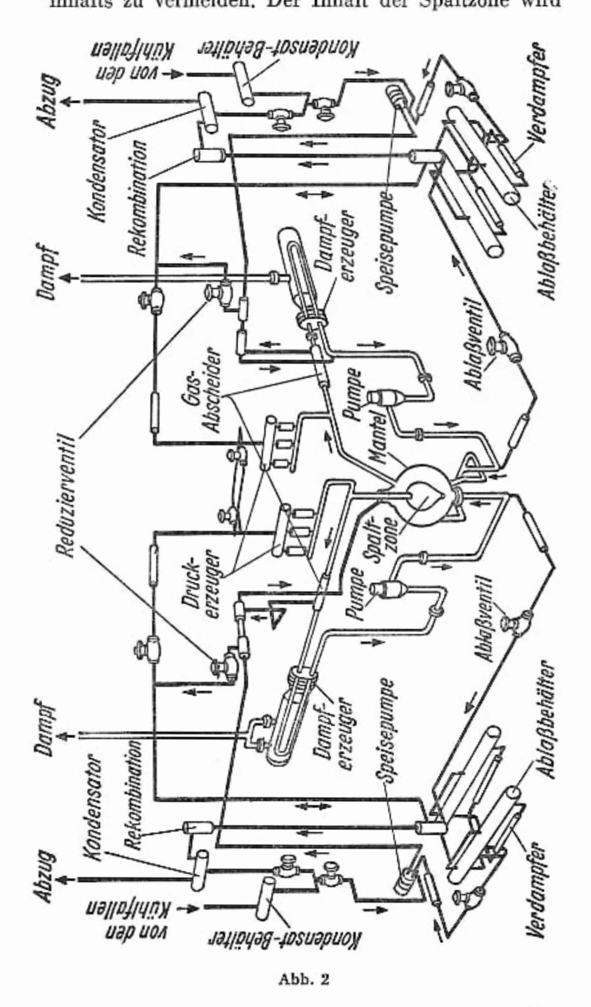


Abb. 2

HRT (Homogenous Reactor Test)

mit 1500 l/min umgepumpt, wobei die Eintrittstemperatur 256, die Austrittstemperatur 300 °C beträgt. Der Inhalt des Mantels zirkuliert mit 870 l/min (Eintrittstemperatur 278, Austrittstemperatur 282 °C).

Die Kreisläufe der Spaltzone und des Mantels sind voneinander getrennt auf beiden Seiten des Reaktorgefäßes angeordnet (Abb. 1). Sie sind bis auf die Dimensionen im wesentlichen identisch. Am Auslaßrohr ist ein elektrisch geheizter Druckerzeuger angebracht. Die Flüssigkeit durchsetzt zunächst den Gasabscheider (allein in der Spaltzone werden pro s etwa 0,027 m³ Gas entwickelt). Im Wärmetauscher wird Sattdampf von 244 °C und 36 ata erzeugt. Die Umwälzpumpe führt die abgekühlte Lösung wieder ins Reaktorgefäß zurück.

Die abgezogenen Gase (D_2, O_2 und gasförmige Spaltprodukte) und Flüssigkeitsreste werden im Niederdrucksystem zunächst in einem Wärmetauscher auf 90 °C abgekühlt und auf Atmosphärendruck entspannt. Die Mischung fließt dann in die Auffanggefäße, welche imstande sind, die gesamte Reaktorflüssigkeit zu speichern. Die Gase werden hier durch Dampf mitgenommen (wobei gleichzeitig die Konzentration unter die Explosionsgrenze heruntergedrückt wird) und in die katalytische Rekombinationsanlage geführt. Das Schwerwasser wird wieder in die Auffanggefäße zurückgeführt. Die verbleibenden radioaktiven Abgase werden über eine Kühlfalle zu Aktivkohle-Absorbern geleitet. Nach ausreichendem Rückhalt werden sie mit Luft verdünnt und über einen Schlot in die Atmosphäre abgeblasen.

Abb. 2 zeigt schematisch die räumliche Anordnung der einzelnen Komponenten des HRT. Die ganze dargestellte Anlage ist von einem Stahltank (2 cm Wandstärke, 18 × 10 × 8 m) umschlossen, der seinerseits von 1,5 m dicken Betonwänden umgeben ist. Der Tank kann im Havariefall den Reaktorinhalt aufnehmen. Für Reparaturen kann der gesamte Tank unter Wasser gesetzt werden, so daß sich ein Schutz für die mit langstieligen Werkzeugen versehenen Arbeiter ergibt. [13]

Lit.: Beall u. Swartout, Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 3, S. 263, Genf, 1955.

HTO, chemische Formel für ein Wassermolekül, in dem ein normales Wasserstoffatom durch ein Atom des Überschweren Wasserstoffisotops Tritium (T) ersetzt ist. Allgemein: Bezeichnung für mit Tritium markiertes Wasser. [24]

HTRE-1. Abk. für Heat Transfer Reactor Experiment No. 1. Prototyp für einen militärischen *Leistungsreaktor zum Atomantrieb von Flugzeugen. In Betrieb seit 1956. Gebaut von General Electric in der National Reactor Testing Station der USAEC, Arco, Idaho. [24]

HTRE-2. Abk. für Heat Transfer Reactor Experiment No. 2. Prototyp für einen militärischen *Leistungsreaktor zum Atomantrieb von Flugzeugen. Im Bau für die USAEC in Lockland, Ohio, durch General Electric. [24]

Hülse, in der Reaktortechnik Bezeichnung für eine metallische Kapsel 1. um den Brennstoff, 2. um Absorberstäbe. 1. Beim Brennstoff soll sie bewirken, daß a) der Brennstoff (Uran) nicht mit dem Moderator oder Kühlmittel, insbesondere Wasser, in Berührung kommt, da gegebenenfalls chemische Reaktionen eintreten, b) Spaltprodukte nicht aus dem Brennstoffelement entweichen können, womit verhütet wäre, daß sie über den Moderator und das Kühlmittel weitere Bezirke in und um den Reaktor in starkem Maße radioaktiv verseuchen. Als H.n metallischer Uranelemente kommen solche aus Aluminium, beständig bis 220 °C, Magnox, rostfreiem Stahl und vor allem Zirkon in Frage.

Die Dicke der Hüllschicht beträgt meist etwa 1 mm. Für die Auswahl des *Hülsenmaterials gelten die gleichen Grundsätze wie für jedes *Strukturmaterial im Kern eines Reaktors. Um einen ungehinderten Wärmefluß vom Brennstoff an das Kühlmittel zu gewährleisten, erstrebt man einen durchgehenden metallischen Kontakt durch eine Lötung zwischen Brennstoff und H. oder die Auffüllung der Zwischenräume durch flüssige (etwa NaK) oder gasförmige (He) Wärmeträger. Wärmewiderstände an dieser Stelle würden sich in einer unerwünschten Erhöhung der Zentraltemperatur im Brennstoffelement auswirken.

2. Beim A b s o r b e r s t a b soll die H. Korrosionsschäden verhindern und die zumeist mechanisch sehr empfindlichen eigentlichen Absorbermaterialien stützen. Letzteres ist vor allem bei den Abschaltorganen wegen der starken Beschleunigungskräfte am Beginn und am Ende des Abschalthubs von Bedeutung. Für die Wahl des H.-Materials ist dabei neben dem Korrosionsverhalten das Material der damit in Kontakt befindlichen Führungsteile maßgeblich, die häufig ständig in der Spaltzone sind und deshalb die gleichen Eigenschaften wie die sonstigen Strukturmaterialien haben müssen. In der Praxis verwendet man daher vorwiegend Aluminium oder einen rostfreien Stahl.

Wegen der nicht unerheblichen Erwärmung der Absorber durch die absorbierte Strahlung und wegen der zumeist sehr niedrigen Schmelzpunkte derselben muß auch hier auf einen guten Wärmekontakt zwischen der H. und den Absorbern geachtet werden. Die spezifische Oberflächenbelastung beträgt z. B. in einem Reaktor mit einem mittleren Neutronenfluß von 10^{13} Neutr/cm^2 s bei Cadmium ungefähr 0,5 Watt/cm^2 und bei Bor-Aluminium-Legierungen (Boral) etwa 1,5 Watt/cm^2. [7, 9, 20]

engl.: can, canning oder *cladding*

franz.: gaine

Lit.: G. E. Lockett, Proc. of the Inst. of El. Eng., Vol. 103, B, 597, 1956. – The Reactor Handbook, Vol. 2, Engineering, McGraw-Hill, New York, 1955.

Hülsenmaterial, Stoffe, die im Reaktor als H. dienen sollen, müssen folgende 4 Bedingungen erfüllen:

1. kleiner Absorptionsquerschnitt für Neutronen,
2. Verträglichkeit mit dem Kühlmittel unter Betriebsbedingungen (Temp., Druck, Korrosion),
3. Verträglichkeit mit dem umhüllten Brennstoff unter Betriebsbedingungen (Bildung intermetallischer Verbindungen, Verschiedenheit des Ausdehnungskoeffizienten und des elastischen Verhaltens),
4. Stabilität gegen Strahlung im Reaktor.

In der folgenden Tabelle werden zwei charakteristische mechanische Eigenschaften von Elementen, die heute – rein bzw. legiert – als H. Verwendung finden, genannt.

Tab. 1. Mechanische Eigenschaften des Hülsenmaterials

	Al	Mg	Be	rostfr. Stahl	Zr	Ta	Mo	Zn
Zugfestigkeit kg/cm²	630	630	4730	6300	3150	9460	12 600	spröde
Temperatur [°C], oberhalb der Kriechvorgänge eine Rolle spielen	150	170	700	700	500	800	850	1000

Die beiden nächsten Tabellen geben die Temperatur an, oberhalb der eine Reakton zwischen Kühlmittel und H. bzw. zwischen Brennstoff und Hülsen einsetzt.

(Tabelle 2 siehe S. 458)

Tab. 3. Kritische Temperaturen für Reaktionen des Hülsenmaterials mit dem Brennstoff

	Uran	Thorium
Al	bildet U-Al-Verbindungen ab 175 °C, U-Al-Eutektikum bei 638 °C	diffundiert in Th bei 450 °C
Mg	keine Reaktion	
Be	Reaktion bei ~ 600 °C	
Fe	bildet Legierungen über 550 °C, U-Fe-Eutektikum bei 725 °C	Eutektikum bei 860 °C
Zr	langsame Reaktion bei 800 °C schnelle Reaktion überm Schmelzp.	
Ta	Reaktion beim Schmelzpunkt schnelle Reaktion über 1300 °C	
Zn	schnelle Reaktion über 1400 °C	

[21]

engl.: can material

franz.: matériaux de gainage

Lit.: L. M. Wyatt, The Production of Reactor Fuel Elements, Nuclear Power 1, Heft 1, 2 u. 3.

Hülsenschaden, s. Brennstoffschäden und Hülsenüberwachung.

engl.: can rupture *franz.: rupture de gaines*

Tab. 2. Kritische Temperaturen, oberhalb der eine Reaktion zwischen Hülsenmaterial und Kühlmittel einsetzt

	Al	Mg	rostfr. Stahl	Zr	Be	Ta
Luft	Schmelzp. 640 °C	300 °C m. Be + Ca b. z. Schmelzp.	500 °C	300 °C	800 °C	300 °C
H_2O	reines: 150 °C Al-Fe-Ni Leg. 300 °C	70 °C	500 °C	Zr-Sn-Ni Legierung 320 °C	unbrauchbar	300 °C
CO_2	Schmelzp.	550 °C	500 °C	450 °C (wenn trocken, höher)	550 °C (wenn trocken, höher)	
H	bis zum Schmelzp. sicher, durchlässig bei hoher Temp.	450 °C durchlässig bei hohen Temp.	unter Strahlung Gefahr der Sprödigkeit	150 °C	600 °C	
He	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher
Na	korrosiv	korrosiv	300 °C	oxydfrei ist es sicher, bei Oxydgehalt 250 °C		oxydfrei ist es sicher, bei Oxydgehalt 250 °C
Bi	korrosiv	korrosiv	400 °C m. Zr 550 °C	korrosiv ab 600 °C	korrosiv	600 °C
Hg	korrosiv	korrosiv	400° C	korrosiv	korrosiv	500 °C

Hülsen-
überwachung

Hülsenüberwachung (Schadenkontrolle) im Betrieb ist aus Sicherheitsgründen nötig. Es können *Brennstoffschäden eintreten, die eine Entfernung des Elementes aus dem Reaktor notwendig machen. Im wesentlichen sind zwei Größen zu überwachen, nämlich die Temperatur der Brennstoffelemente und der Zustand der Brennstoffhülsen. Erstere kann mit Thermoelementen gemessen werden. Schwieriger ist die H., die einen sich entwickelnden Hülsenschaden so früh und möglichst lokalisiert anzeigen soll, daß ein unangenehmer Austritt von Spaltprodukten in das Kühlmittel vermieden werden kann. Bis jetzt werden dazu folgende Effekte ausgenützt:

a) Abnahme des Kühlmittelflusses durch auftretende Beulen an der Hülse *(swelling)*,
b) Zunahme des Druckverlustes durch Beulen,
c) Abnahme des He-Gasdruckes, im Falle daß He zur Verbesserung des Wärmeüberganges Brennstoff – Hülse verwendet wird,
d) Anstieg der Radioaktivität des Kühlmittels.

Durch Messung von a) und b) können Hülsenschäden, die eine größere Deformation der B.-Oberfläche zeigen (z. B. große Ausdehnung des Brennstoffs, Beulen), schon im Entstehungsstadium erkannt werden. Vor allem ist diese Methode bei flüssigen Kühlmitteln (kleine Kühlkanäle) geeignet. Methode c) ist zum Erkennen aller Hülsenschäden geeignet. Sie hat nur den Nachteil, daß jedes Element an ein Meßröhrchen angeschlossen werden muß. – Im allgemeinen ist eine Messung von d) am empfindlichsten, jedoch muß der Schaden schon bis zum Entweichen von Spaltprodukten entwickelt sein. Die Empfindlichkeitsgrenze der Methode wird durch die kaum zu vermeidende Verunreinigung der Hülsenoberfläche mit Uran – dessen Spaltprodukte immer ins Kühlmittel gelangen – bestimmt. Es werden von 4,7 mg fein verteiltem natürlichem Uran gerade so viel Spaltprodukte frei, wie durch 1 cm^2 Oberfläche von festem Uran treten.

Beobachtet man die Gesamtaktivität des Kühlmittelstromes eines B. (Messung der β-, γ- bzw. Neutronenstrahlung), so setzt sich das Meßergebnis aus vier Anteilen zusammen, nämlich

α) dem natürlichen Untergrund,

β) der Aktivität des eigentlichen Kühlmittels,

γ) der Aktivität der von Uranspuren stammenden Spaltprodukte,

δ) durch Hülsenschaden bedingte Aktivität.

Man ist deshalb bestrebt, den Anteil $\alpha + \beta + \gamma$ so klein wie möglich zu machen. Ein Mittel dazu ist die selektive Messung der Strahlung von Spaltprodukten, wodurch sich der Anteil β ausschalten läßt. Werden die von einigen Spaltprodukten emittierten verzögerten Neutronen zur Messung benutzt, so muß die γ-Strahlung des Kühlmittels gering sein. Ferner darf dieses keinen Sauerstoff enthalten, der zu einer Neutronenemission vergleichbarer Stärke Anlaß gibt. Außerdem reagiert ein beträchtlicher Teil der dazu in Frage kommenden Spaltprodukte, nämlich die Halogene, mit den Materialien des Kreislaufes und gehen so für die Anzeige verloren. Ein wichtiger Nachteil der Messung der Gesamtintensität ist, daß ein beobachteter Aktivitätsanstieg sich auf alle genannten Faktoren verteilen kann. Meistens wird daher diese Meßmethode nur als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme verwendet neben: 1. Dem Nachweis bestimmter Spaltprodukte (Jod-Isotope) nach Aufspeicherung in einem Ionenaustauscher. – 2. Dem Nachweis von Spaltgasen (Xe + Kr), die bei wassergekühlten Reaktoren durch ein Spülgas aus einer Kühlwasserprobe ausgewaschen werden. – 3. Dem Nachweis von verzögerten Neutronen. – In jedem Falle bedeutet eine Schadenskontrolle einen großen Aufwand, weil aus jedem Brennstoffelement, bzw. aus jedem Kühlkanal eine kleine Menge des Kühlmittels kontinuierlich abgezogen und über die Meßvorrichtung geleitet werden muß. Die Messung ist in jedem Falle sehr schwierig. [20, 21]

engl.: can rupture detection

franz.: détection de ruptures de gaines

Lit.: Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. 9, Genf, 1955.

Hume-Rothery-Phase, s. Intermetallische Verbindungen.

engl.: Hume-Rothery phase

franz.: phase de Hume-Rothery

H-D-Empfindlichkeit, s. Nachtrag.

Hunterston, britische Reaktorstation mit verbesserten Calder-Hall-Typ-Reaktoren.

HWS, Abk. für Halbwertsschicht.

HYDRO. Bezeichnung für kleinen, transportablen, wassergekühlten *Versuchsreaktor des Los Alamos Scientific Lab. der USAEC, für militärische Anwendung. Wärmeleistung bis 3000 kW. [24]

Hydrochlorination ist die Überführung von Metallen in die Chloridform mittels Salzsäure. Bei der Kernbrennstoffaufbereitung wird die Auflösung edelstahllegierter Uran-Brennstoffelemente in Autoklaven bei hohen Temperaturen vorgenommen. [22]
engl.: hydrochlorination
franz.: (hydro)chloruration

Hydroklone sind hochwirksame Zentrifugen. Sie werden bei der Kernbrennstoffaufbereitung zur kontinuierlichen Reinigung (flüssiger Kernbrennstofflösungen (bei Homogenreaktoren) von unlöslichen Verunreinigungen, z. B. Korrosionsprodukten benutzt. [22]
engl.: hydroclone (sing.) *franz.: hydroclone*

Hydromagnetische Gleichungen. Die H. G. sind die makroskopischen Erhaltungssätze der *Magnetohydrodynamik, in Analogie zu den hydrodynamischen Gleichungen. Diese sind im wesentlichen die Kontinuitätsgleichung und die Bewegungsgleichungen, dazu kommt noch der Erhaltungssatz der Energie. In der Hydrodynamik werden generell die *Navier-Stokesschen Gleichungen verwendet. In der Magnetohydrodynamik wurden die Navier-Stokesschen Gleichungen beibehalten und für die äußere Kraft diejenige des elektromagnetischen Feldes eingeführt. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Navier-Stokesschen Gleichungen im Falle eines Plasmas nicht unbedingt gültig sind. Eine strenge Ableitung der hydromagnetischen Gleichungen geschieht mit Hilfe der *Liouville-Gleichung. Die neuen hydromagnetischen Gleichungen, die Kontinuitätsgleichung ($\partial/\partial \mathfrak{r} \equiv \mathrm{grd}$)

$$\frac{\partial \varrho_\nu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathfrak{r}} \cdot (\varrho_\nu \mathfrak{v}_\nu) = m_\nu K_\nu$$

und die Bewegungsgleichungen

$$\varrho_\nu \left[\frac{\partial}{\partial t} \mathfrak{v}_\nu + \mathfrak{v}_\nu \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \mathfrak{r}} \mathfrak{v}_\nu \right) \right] = \frac{\partial}{\partial \mathfrak{r}} \cdot \mathfrak{P}_\nu + n_\nu \mathfrak{F}_\nu + + \varrho_\nu \mathfrak{v}_\nu K_\nu + \varrho_{e,\nu} \mathfrak{E}^{ext} + \frac{1}{c} \mathfrak{J}_{e,\nu} \cdot \mathfrak{B}^{ext} + \mathfrak{C}_\nu$$

gelten für den Fall eines vollionisierten Plasmas, in welchem auch Reaktionen (K Reaktionsgeschwindigkeit) ablaufen können. Dabei ist die Emission und Absorption der Strahlung, sowie die Wechselwirkung von Strahlung und Materie und die Wechselwirkung der Teilchen infolge „innerer" elektrischer und magnetischer Felder (z. B. elektrostatische Wechselwirkung) in dem sog. Coulomb-Integral

$$\mathfrak{C}_\nu = N_\nu \cdot e_\nu \cdot \sum_k \int \int \ldots \int \left(\mathfrak{E}_\nu^{int} + \frac{\mathfrak{v}_\nu}{c} \mathfrak{B}^{int} \right) \delta(\mathfrak{r} - \mathfrak{r}_k) \cdot f \cdot d\mathfrak{r}_1 \ldots d\mathfrak{r}_n \cdot d\mathfrak{v}_1 \ldots d\mathfrak{v}_n$$

ausgedrückt. Der Index ν bezeichnet die ν-te Komponente im Plasma. $\mathfrak{v}_\nu$ ist die mittlere Massengeschwindigkeit der ν-ten Komponente, ϱ die Dichte, $\mathfrak{P}$ der Drucktensor, ϱ_e die Ladungsdichte, $\mathfrak{J}_e$ der (elektr.) Strom, $\mathfrak{E}^{ext}$ und $\mathfrak{B}^{ext}$ sind die „äußeren" elektrischen und magnetischen Felder. Im Coulomb-Integral ist $\delta(\mathfrak{r} - \mathfrak{r}_k)$ die Diracsche Deltafunktion, $f = f(\mathfrak{r}_1 \ldots \mathfrak{r}_n, \mathfrak{p}_1 \ldots \mathfrak{p}_n, t)$ die Wahrscheinlichkeitsdichte. Ein Verfahren zur Lösung des Coulomb-Integrals ist bis jetzt nicht bekannt. [27]

engl.: hydromagnetic equations

franz.: équations hydro-magnétiques

Lit.: W. E. Brittin, Phys. Rev. 106, 843, 1957. – H. J. Kaeppeler, Mitt. Forsch. Inst. Physik der Strahlantriebe, Nr. 15, Stuttgart, 1958.

hydrophob = schwer benetzbar, wasserabstoßend, s. Flotieren.

Hydroxylion, OH^-, negativ geladenes OH. Das H. ist das Kennzeichen einer Base im wäßrigen System, während das Wasserstoffion H^+ das Kennzeichen einer Säure ist. Wasser dissoziiert zu gleichen Teilen in H^+ und OH^- (je 10^{-7} mol/l), ist also neutral. [18]

engl.: hydroxyl ion

franz.: ion hydroxyle

Hydroxylradikal. Ungeladenes Teilchen der Formel OH oder OH·. Das Radikal tritt bei der Radiolyse von Wasser auf. Seine Lebensdauer ist sehr kurz. Die auftretende Konzentration von OH bei der Wasserzersetzung ist abhängig von der Art der ionisierenden Strahlung. Bei hohen Ionendichten auf der Spur eines Teilchens können OH-Radikalkonzentrationen bis zu einem Mol/l auftreten. Das Hydroxylradikal besitzt ein hohes Oxydationspotential, es werden deshalb fast alle Stoffe nach

$$OH\cdot + A \rightarrow A^{+} + OH^{-}$$

oxydiert. [18]
engl.: hydroxyl radical
franz.: radical hydroxyle

Hypersorptionsverfahren, s. Adsorption.
engl.: hypersorption
franz.: hypersorption

Hz, Abk. für *Hertz. [1]

I

IAEA. Abk. für International Atomic Energy Agency (*Internationale Atomenergie-Organisation). [24]

IAEO, amtl. deutsche Abk. für *Internationale Atomenergie-Organisation. [24]

Ianthinit, sekundäres, violettes bis schwarzes Uranmineral mit 80,87 % UO_2-Gehalt. [24]

I.C.R.P. (International Commission on Radiological Protection = Internationale Kommission für Strahlenschutz). Die I.C.R.P. arbeitet im Auftrage des Internationalen Kongresses für Radiologie und wurde erstmals 1928 eingesetzt, um Richtlinien für den Strahlenschutz aufzustellen. Die Satzungen, die im Jahre 1953 durch das International Executive Committee (I.E.C.) des Kongresses verbessert wurden, regeln die Zusammensetzung und die Arbeit der I.C.R.P. [28]

ih, gesprochen iha, Abk. für eine bestimmte Bezugsweise der Reaktivität. Diese ist dadurch gekennzeichnet, daß die stabile *Reaktorperiode gleich 1 Stunde ist. ih ist aus *inhour* gebildet, das wiederum aus *inverse hour* zusammengezogen ist. S. Stunde, reziproke. [7]

Ilmenit ist ein Mineral der Zusammensetzung $FeTiO_3$. [26]
engl.: ilmenite *franz.: ilménite*

Impuls. In der Elektronik versteht man unter einem I. einen äußerst kurz dauernden Spannungs- oder Stromstoß (Zeitdauer Mikrosekunden oder noch kürzer). In der Kernphysik spielen vor allem die Zählimpulse eine Rolle, die Stromstöße, die in einem Zählrohr oder sonstigen Zähler durch den Durchgang eines energiereichen Teilchens ausgelöst werden. Für deren weitere Verarbeitung in der nachfolgenden Schaltung ist außer der Dauer des I.s der genaue zeitliche Verlauf des Stromes bzw. der Spannung, die „Form“ des I.s von Bedeutung (z. B. „Rechteckimpuls“ oder anderes). Auch viele Beschleuniger arbeiten im „Impulsbetrieb“, d. h. sie liefern keine zeitlich kontinuierliche Strahlung, sondern nur in regelmäßigen Abständen kurze I.e von Strahlung. [1]
engl.: pulse
franz.: impulsion

Impulsfrequenzmesser, s. Mittelwertmesser.
franz.: compteur de fréquence d'impulsions

Impulsgenerator. Hilfsgerät zur Prüfung von Verstärkern, Untersetzern, Registriergeräten u. ä. m. Erzeugt Impulse von regelbarer Leistung, Form, Dauer, Frequenz und Höhe. [6]
engl.: pulse generator
franz.: générateur d'impulsions

Impulshöhenanalysator, s. Diskriminator.
engl.: pulse height analyser
franz.: sélecteur d'amplitude

Impulshöhenanalyse, strahlenanalytisches Verfahren, das auf der Umwandlung der Energie von absorbierten Strahlungsquanten in energieproportionale elektrische Spannungsstöße (Spannungsimpulse) beruht. Die elektrischen Impulse werden ihrer Höhe nach sortiert und getrennt gezählt, so daß die dadurch gewonnene Impulshöhenverteilung ein Abbild des Energiespektrums der Strahlung darstellt. [16]
engl.: pulse height analysis
franz.: analyse de la hauteur des impulsions oder *discrimination*

Impulsmodulation, s. Modulation.
engl.: pulse modulation
franz.: modulation d'impulsions

Impulsspektrograph. Gerät zur Sortierung und Registrierung von Impulsen nach ihrer Größe. Da die Impulshöhe oder das Zeitintegral des Impulsstromes bei Zählrohren im Proportionalbereich und bei Szintillationszählern der Teilchenenergie proportional ist, ergibt die Anzeige des I. das Energiespektrum der beobachteten Strahlung. [6]
engl.: spectrograph, pulse spectrograph
franz.: spectrographe à impulsions

Impulsverstärker, elektronisches Gerät, mit dem Spannungsstöße verstärkt werden. Die meisten Strahlungsmeßgeräte liefern so kleine Impulshöhen, daß I. notwendig sind (z. B. *Szintillationszähler und *Proportionalzähler).
Maßgebend für die Beurteilung von I. sind:
1. der Verstärkungsfaktor (für Szintillationszähler werden Verstärkungsfaktoren bis etwa 10^3, für Proportionalzähler bis 10^5 benötigt),
2. die Anstiegszeit des Ausgangsimpulses bei unendlich steilem Eingangsimpuls; sie bestimmt die maximale Zählfrequenz,
3. die Übersteuerungsfestigkeit (sie ist besonders bei I., die vor Impulshöhenanalysatoren (*Diskriminatoren) geschaltet sind, wichtig, wenn Spektrallinien niedriger Energie in Anwesenheit sehr vieler Strahlung hoher Energie ausgemessen werden sollen). [17]
engl.: pulse amplifier
franz.: amplificateur d'impulsions

Impulsverteilung, s. Verteilungsfunktion.
engl.: momentum distribution
franz.: distribution d'impulsions

Impulsvorwahl, s. Impulszähler.
franz.: prédétermination du nombre d'impulsions

Impulszähler. Ganz allgemein ein Gerät, das die Anzahl der elektrischen Impulse mißt, die auf seinen Eingang während einer bestimmten Zeit gegeben werden. Wird meist in Verbindung mit *U n t e r s e t z e r n und ähnlichen Einrichtungen benutzt. Als Impulse werden in der Reaktortechnik meistens die von

einer Ionisationskammer, Spaltkammer oder einem Zählrohr herrührenden Stromimpulse benutzt. Man unterscheidet Geräte mit mechanischen Zählwerken, mit elektronischen Zählwerken und mit einer Kombination von elektronischen und mechanischen Zählwerken. Mechanische Zählwerke können bis etwa 1000 Impulse in einer Sekunde in regelmäßiger Aufeinanderfolge registrieren. Bei statistisch verteilten Impulsen liegt diese Zahl je nach der geforderten Genauigkeit bedeutend tiefer. Elektronische Anzeigegeräte lassen sich bis zu Geschwindigkeiten von etwa 10^9 regelmäßigen Impulsen pro Sekunde bauen. Impulszählgeräte für die Kerntechnik werden häufig mit einem Uhrwerk zusammen gebaut. Entweder schaltet das mechanische oder elektrische Uhrwerk den I. über eine vorgegebene Zeit ein und läßt die Anzahl der Impulse anzeigen (Zeitvorwahl). Umgekehrt kann auch eine vorgegebene Anzahl von Impulsen eingestellt werden. Das Uhrwerk zeigt dann die Zeit an, in der die vorgegebene Impulszahl erscheint (Impulsvorwahl). [6]
engl.: pulse counter
franz.: compteur d'impulsions

Indeterminismus in der Atomphysik, s. Dualismus, Kausalprinzip, Unbestimmtheitsrelation.

Indian Point-Atomkraftwerk. Nach dem Standort gewählte Bezeichnung für das amerikanische *Consolidated Edison-Atomkraftwerk. [24]

Indifferenzdosis, gleichbedeutend mit *Toleranzdosis.

Indikator, radioaktiver (s. a. Markierung). Ein radioaktives Isotop, das einer Substanz beigegeben bzw. in ein Molekül eingeführt wird, um die so markierten Stoffe z. B. durch biologische oder chemische Prozesse hindurch zu verfolgen. Die Indikatormethode, mit der schon ein paar tausend Moleküle erfaßt werden können, ist weit empfindlicher als andere Analysenmethoden.
Zur Unterscheidung von chemischen Indikatoren (z. B. zur Bestimmung des p_H-Werts) spricht man besser von *Leitisotopen. [3]
engl.: radioactive tracer
franz.: traceur radioactif, indicateur radioactif

Indikatoratom, ein Atom eines (meist künstlichen) radioaktiven Isotops, das für die *Indikatormethode verwendet wird. Bessere Bezeichnung: *Leitisotop. [1]
engl.: tracer *franz.: atome traceur*

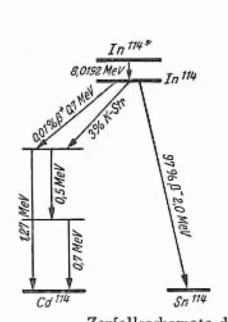
Indikatormethode, s. Leitisotopenmethode.

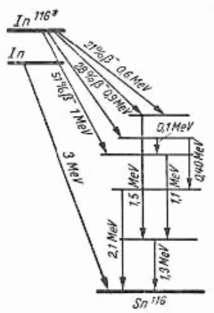
Indium (In), seltenes Element der Ordnungszahl 49 in der dritten Gruppe des Periodischen Systems. Das natürlich vorkommende In besteht zu 95,8 % aus dem radioaktiven Isotop $^{115}_{49}\mathrm{In}$, das eine Halbwertszeit von $6 \cdot 10^{14}$ a besitzt.

$$^{115}_{49}\mathrm{In} \xrightarrow[6 \cdot 10^{14}\,\mathrm{a}]{\beta^-} {}^{115}_{50}\mathrm{Sn}\,.$$

In hat eine hohe Neutronenabsorption an verschiedenen Resonanzstellen, von denen die bei niedrigster Energie (1,5 eV) den größten Wirkungsquerschnitt ($3 \cdot 10^4$ b) hat. In-Folien dienen daher als Detektoren für Neutronen dieser Energie. Der Nachweis beruht auf der β-Aktivität des bei der Neutronenanlagerung entstehenden ^{116}In. [3, 7]
engl.: indium *franz.: indium*

Indium 114 und 116, β^-- und γ-Strahler. Beide Isotope haben zwei Isomere. $^{116}\mathrm{In}^*$ hat bei einem Fluß von 10^{14} langsamen Neutronen $\mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$ eine Sättigungsaktivität von 2000 Curie/g, wenn vom natürlichen Isotopengemisch des In ausgegangen wird. Wegen die-





Zerfallsschemata der Indiumisotope 114 und 116

^{114}In (angeregt)
Halbwertszeit: 49 Tage
^{114}In (Grundzustand)
Halbwertszeit: 1,2 Min.

^{116}In (angeregt)
Halbwertszeit: 54 Min.
^{116}In (Grundzustand)
Halbwertszeit: 13 Sek.

ser hohen Aktivität wird In häufig als Sondensubstanz zur Messung langsamer Neutronenflüsse benützt. Allerdings ist die Halbwertszeit des ^{116}In nur kurz: angeregt 54 min, Grundzustand 13 s. Die Halbwertszeit des $^{114}In^*$ beträgt dagegen 50 Tage, so daß in der Isotopentechnik unter Verzicht auf die extrem hohe Nachweisempfindlichkeit des ^{116}In meist mit dem Isotop 114 gearbeitet wird.
In der Regel werden beide Isotope über eine (n, γ)-Reaktion durch Bestrahlung des natürlichen In mit langsamen Neutronen erzeugt. In reagiert auch auf schnelle Neutronen mit einer (n, 2n)-Reaktion. Es entsteht dabei ^{114}In. [16]

Individualdosimeter, Strahlungsmeßgeräte, die von einer Person getragen werden, um die Strahlendosis, die die Person erhalten hat, zu bestimmen.
Die γ-Strahlendosis kann durch Taschenionisationskammern mit luftäquivalentem Wandmaterial gemessen werden. Zur Bestimmung der β- und γ-Dosis können photographische Filme dienen. Hierzu wird ein Teil des Films so abgeschirmt, daß ihn keine β-Strahlen treffen können. Die β-Dosis ist dann durch die Differenz der Schwärzung mit und ohne Abschirmmaterial gegeben.
Langsame Neutronen können mit Taschenionisationskammern aus borhaltigem Material oder mit Filmen, die mit Cadmium abgedeckt sind, nachgewiesen werden. Zur Dosismessung bei schnellen Neutronen können die Spuren der *Rückstoßprotonen in *Kernspurplatten ausgezählt werden. [17]
engl.: personal monitor
franz.: dosimètre individuel

Individualdosimetrie, s. Personenüberwachung.
engl.: individual dose meter
franz.: dosimétrie du personnel

Indizierung von Spalt- und Brutstoffen. Bei der Aufstellung von Bilanzen des Stoffumsatzes im Reaktor (Abbrand, Umwandlung usf.) ist es zweckmäßig, die verschiedenen Spaltstoffe, Brutstoffe und Aufbaukerne durch geeignete Indizes an kernphysikalischen Größen (Wirkungsquerschnitten σ, Vermehrungsfaktoren ν, η usw.) zu kennzeichnen. Es ist üblich, zwei Indizes zu

verwenden. Der erste ist die letzte Ziffer der Ordnungszahl, der zweite die letzte Ziffer der Massenzahl. Es ergibt sich folgendes Schema für die wichtigsten der in Frage kommenden Isotope:

Spaltstoffe

U^{233}	U^{235}	Pu^{239}	Pu^{241}
23	25	49	41

Brutstoffe

U^{238}	Th^{232}
28	02

Höhere Isotope

U^{236}	Pu^{240}	Pu^{242}
26	40	42

[13]

I-Neutronen sind solche, die vom Jod *(iodine)* stark absorbiert werden. Sie haben eine Energie um 36 eV, der Resonanzenergie des Jods. Der Ausdruck ist veraltet. [7]
engl.: I-neutrons
franz.: neutrons I

Ingot, Metallbarren. Durch Umschmelzen (evtl. *Hochvakuumschmelzen) und Gießen des *Regulus oder von Metallschwamm gewonnen, besitzt er eine regelmäßigere Form als diese und meist auch eine größere Reinheit. [20]
engl.: ingot
franz.: lingot

inhärent, s. Nachtrag.

inhour-Formel, s. Stunde, reziproke.

Inkorporation (svw. Aufnahme in den Körper, besonders bei der Aufnahme radioaktiver Substanzen in den menschlichen Körper). Bei der I. natürlicher oder künstlicher radioaktiver Substanzen sind folgende Punkte wichtig:
1. die radioaktive *Halbwertszeit;
2. die Qualität und Energie der Strahlung. So sind z. B. die dicht ionisierenden α-Strahlen und Neutronen biologisch wirksamer als die weniger dicht ionisierenden Strahlen wie Röntgen- und γ-Strahlen sowie β-Strahlen. Die Internationale Strah-

lenschutzkommission hat dem Rechnung getragen, indem sie die Toleranzdosis für dicht ionisierende Strahlen um den Faktor 10 reduziert hat;

3. das sog. Verteilungsmuster. Dies zeigt die für das betreffende Radioisotop spezifische und typische Verteilung auf die verschiedenen Organe und Gewebe. Dabei haben fast alle radioaktiven Isotope eine besondere Affinität zu bestimmten Organen, z. B. J 131 zu der Schilddrüse;

4. Höhe der Resorption aus den Atmungsorganen und dem Magen-Darm-Trakt. Diese Resorptionshöhe ist ebenfalls unterschiedlich, bei einzelnen radioaktiven Isotopen geht sie langsam und bei einzelnen schnell;

5. die Intensität der Ausscheidung. Auch sie ist wie die Resorption unterschiedlich.

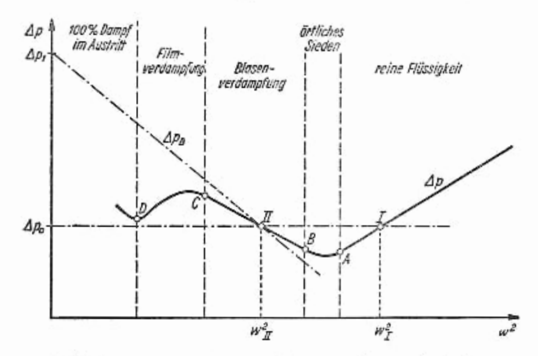
Erst die Berücksichtigung aller dieser Faktoren ergibt einen ungefähren Überblick über die Vorgänge bei der Inkorporierung radioaktiver Substanzen. [28]

engl.: incorporation

franz.: introduction de corps radioactifs

Instabilität von Strömungen in Kühlkanälen. In Reaktoren mit zahlreichen parallelen Kühlkanälen kann eine erzwungene Strömung unter gewissen Bedingungen instabil sein, d. h. eine kleine Störung der stationären Strömungsverhältnisse kann die Durchflußmenge in einem Kanal stark reduzieren und so zu dem Durchbrennen eines Brennstoffstabes führen. Die Durchflußmenge in den übrigen Kanälen wird sich dabei etwas erhöhen. Bei konstanter Wärmezuführung ergibt sich für den Druckabfall Δp in einem Kühlkanal in Abhängigkeit von dem Quadrat der Geschwindigkeit w^2 eine charakteristische Kurve (Abb.). Bei hohen Geschwindigkeiten befindet sich das Kühlmittel nur in der flüssigen Phase und der Druckabfall ist angenähert proportional zu w^2. Bei abnehmender Geschwindigkeit kommt man in einen Bereich AB, wo örtliches Sieden eintritt. Die erzeugten Dampfblasen zerstören teilweise die laminare Grenzschicht und vergrößern daher den Strömungswiderstand. In dem Bereich der Blasenverdampfung BC steigt der Druckabfall weiterhin mit fallender Geschwindigkeit, bis sich schließlich der

Übergang zur Filmverdampfung einstellt, bei der der Druckverlust mit fallender Geschwindigkeit wieder abnimmt bis zum Punkt D, der dann erreicht wird, wenn



im Kühlkanalaustritt gerade ein Dampfgehalt von 100 % erreicht wird. Das Durchbrennen des Brennstoffstabes erfolgt meist in der Umgebung des Punktes C. Nimmt man an, daß in einem Reaktor zwischen Ein- und Austritt stets eine konstante Druckdifferenz Δp_0 aufrechterhalten wird, so ist eine stationäre Strömung bei den Geschwindigkeiten w_I (ohne Sieden) und w_{II} (mit Blasensieden) möglich. Bei der Geschwindigkeit w_I ist die Strömung stabil; wird nämlich durch eine Störung die Durchflußmenge und damit die Geschwindigkeit herabgesetzt, so sinkt Δp unter den Wert Δp_0, dadurch wird die Flüssigkeit beschleunigt und erreicht wieder die stationäre Geschwindigkeit w_I. Bei der Geschwindigkeit w_{II} ist die Strömung jedoch instabil. Eine beliebig kleine Abnahme der Durchflußmenge hat zur Folge, daß $\Delta p > \Delta p_0$ wird, wodurch das Kühlmittel weiterhin verzögert wird. Die Geschwindigkeit nimmt stetig ab, bis schließlich der Brennstoffstab durchbrennt. Es läßt sich jedoch z. B. mittels einer Drossel am Kühlkanaleintritt auch bei w_{II} eine stabile Strömung aufrechterhalten. Man erzeugt dadurch einen zu w^2 proportionalen Eintrittswiderstand. Die zur Erhaltung der Strömung im Kühlkanal verfügbare Druckdifferenz Δp_B ist daher proportional zu $-w^2$. Im $\Delta p,w^2$-Diagramm läßt sie sich daher durch eine Gerade

darstellen. Sorgt man nun dafür, daß die Gerade im Punkt II steiler verläuft als die Δp-Kurve, so hat man einen stabilen Strömungszustand bei der Geschwindigkeit w_{II}, denn bei einer durch eine Störung verursachten Verringerung der Durchflußmenge wird $\Delta p < \Delta p_B$, wodurch das Kühlmittel so lange beschleunigt wird, bis wieder $\Delta p = \Delta p_B$ ist. Die Verwendung von Drosseln erfordert allerdings eine größere Druckdifferenz Δp_1 zwischen Ein- und Austritt und damit auch eine höhere Pumpenleistung. Die genaue Form der $\Delta p, w^2$-Charakteristik wird wesentlich von Druck, Unterkühlung und Heizflächenbelastung beeinflußt. Bei starker Unterkühlung kann sich z. B. der Bereich des örtlichen Siedens bis zur Filmverdampfung ausdehnen und die Kurve wird in diesem Fall flacher verlaufen. Sie besitzt jedoch im wesentlichen dieselben Merkmale. Der Anstieg des Druckabfalls im Bereich des Siedens (BC) ist bei einer Abwärtsströmung erheblich größer als bei einer Aufwärtsströmung, da der zur Beschleunigung des Kühlmittels (infolge der durch die Erwärmung hervorgerufenen Dichte- und damit Geschwindigkeitsänderungen) erforderliche Druckabfall Δp_b bei einer Abwärtsströmung größer ist. Der Grad der Instabilität ist daher bei einer Abwärtsströmung stets höher als bei einer Aufwärtsströmung. Selbst bei einer Strömung ohne Sieden kann, wenn sie abwärts gerichtet ist, ein Instabilitätsbereich der geschilderten Art auftreten, falls Δp_b einen großen Anteil des gesamten Druckverlustes Δp ausmacht. Das ist dann der Fall, wenn für die Strömung nicht $\mathrm{Gr/Ka} \leqslant 2$ ist (dabei ist Gr die *Grashof- und Ka die *von Kármán-Zahl). [5]

engl.: flow instability

franz.: instabilité d'écoulement

Lit.: C. F. Bonilla, Nuclear Engineering, McGraw-Hill, New York, 1957.

Institutt for Atomenergi. Norwegische, überwiegend staatlich finanzierte Organisation für Atomforschung und Atomenergieentwicklung. Norwegischer Träger des gemeinsamen norwegisch-holländischen Atomenergie-Instituts *JENER. Sitz Kjeller. Abk.: IFA. [24]

Integral. Als I. bezeichnet man – abgesehen von der elementarmathematischen Bedeutung – die Lösung einer Differentialgleichung. Wenn die Differentialgleichung vom zweiten Grad ist, so ist zur Lösung eine zweifache Integration nötig. Die erste Integration bezeichnet man dann als intermediäres I. Dieses hat bei der Integration der Bewegungsgleichungen eine physikalische Bedeutung; es stellt nämlich einen der Erhaltungssätze dar (Energiesatz, Drehimpulssatz usw.).
Bei jeder Integration tritt eine Konstante auf. Lösungen von Differentialgleichungen, die nicht die erforderliche Zahl von frei verfügbaren Konstanten haben, die also nicht die allgemeinste Lösung darstellen, bezeichnet man als partikuläre I.e oder partikuläre Lösungen. [7]
engl.: integral
franz.: intégrale, fonction intégrale

Integraldosis, ein Maß für die gesamte Energie, die von Materie während der Bestrahlung aufgenommen wird. Sie ist das Produkt aus der Dosis in r oder rad und dem Gewicht des bestrahlten Körpers. Da die Dosis in einem Körper nicht an allen Stellen gleich ist, muß die I. durch Integration gewonnen werden. Die Einheiten der I. sind das *Gramm-Röntgen und das *Gramm-rad. [17]
engl.: integral dose
franz.: dose intégrale

Integralgleichung der Neutronendiffusion. Die *Boltzmann-Gleichung der Neutronendiffusion ist mit einer I. äquivalent. Im stationären Fall lautet diese

$$N(\mathfrak{r}, E, \vec{\Omega}) = \int_R \mathrm{d}V' \int_0^\infty \mathrm{d}E' \int_\Omega \mathrm{d}\vec{\Omega}'\, N(\mathfrak{r}', E', \vec{\Omega}') \times$$
$$\times K(\mathfrak{r}', E'\,\vec{\Omega}' \rightarrow \mathfrak{r}, E, \vec{\Omega}) + Q(\mathfrak{r}, E, \vec{\Omega}).$$

Dabei bedeutet N die (orts-, energie- und richtungsabhängige) Neutronendichte, Q eine äußere Quelle und K einen Kern, der die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, daß ein Neutron am Ort $\mathfrak{r}'$, mit der Energie E' und Flugrichtung $\vec{\Omega}'$ durch einen Stoß mit einem Kern

des Mediums an den Ort $\mathfrak{r}$ gelangt und die Energie E und Flugrichtung $\vec{\Omega}$ erhält (s. Transportkerne). Die I. spricht einen Erhaltungssatz für die Neutronenzahl aus: Die Dichte N muß sich aus dem Beitrag der äußeren Quelle und den Beiträgen der verschiedenen Volumselemente, Energien und Richtungen zusammensetzen.

Im einfachsten Fall handelt es sich um ein homogenes Medium, in dem die Neutronen ohne Bremsung mit gleichmäßiger Richtungsverteilung diffundieren. Die (monoenergetische) I. lautet dann

$$N(\mathfrak{r}) = (\Sigma_s + \nu\,\Sigma_f) \int\limits_R N(\mathfrak{r}')\,\frac{e^{-(\Sigma_s + \Sigma_a)\,|\mathfrak{r}-\mathfrak{r}'|}}{4\,\pi\,|\mathfrak{r}-\mathfrak{r}'|^2}\,dV'\,.$$

Durch Entwicklung von N in eine Taylor-Reihe nach $\mathfrak{r}$ ergibt sich, wenn man mit dem zweiten Glied der Entwicklung abbricht, die gewöhnliche *Diffusionsgleichung. Zur Lösung der I. kann u. a. die *Feynman-Methode herangezogen werden. [13]

engl.: integral equation of neutron diffusion

franz.: équation intégrale de la diffusion des neutrons

Lit.: B. Davison, Neutron Transport Theory, Clarendon Press, Oxford, 1957.

Integral-Kerne, s. Diffusionskerne, ferner Bremskerne und Transportkerne.

engl.: integral kernels

franz.: noyaux intégrals

Integrator, in der Analogrechen- und Regeltechnik übliche Bezeichnung für Übertragungsglieder mit rein integraler Übertragungsfunktion. Weiteres s. u. Übertrager, Regler, Regelung. [9]

engl.: integrator

franz.: intégrateur

Lit.: M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw-Hill, New York, 1955. – G. A. Korn, T. M. Korn, Electronic Analog Computers, McGraw-Hill, New York, 1956.

Integrierschaltungen. Schaltungen mit Röhren und Transistoren, bei denen ein Kondensator mit der Kapazität C durch jeden ankommenden Impuls mit einer konstanten Ladung Q aufgeladen wird. Die Entladung erfolgt durch einen großen Widerstand R oder über eine Röhrenschaltung, die einen konstanten Entlade-

strom fließen läßt. Bei n ankommenden Impulsen je Sekunde fließt durch den Widerstand R im Mittel der Strom $J = n\,Q$. Er dient als Maß für die Impulszahl je Sekunde (n). Die Zeitkonstante RC und die Trägheit des Anzeigeinstrumentes müssen genügend groß sein, um einen konstanten Ausschlag zu erzielen. [6]
engl.: integrating circuit
franz.: montage intégrateur

Intensitätsmesser, s. Mittelwertmesser und Dosisleistungsmesser.
engl.: intensity meter
franz.: intensimètre

Interim-23-Hexon-Prozeß ist die Bezeichnung für einen Thorium-Uran-Aufbereitungsprozeß zur Entgiftung von Thorium und Uran und Trennung beider voneinander ($23 = {}^{233}_{92}U$). Der I.-23-H.-P. arbeitet mit Hexon als organisches Extraktionsmittel. Er unterscheidet sich vom *Redox-Prozeß nur dadurch, daß das Thorium von Hexon nicht extrahiert, sondern gemeinsam mit den Spaltprodukten in der ersten Separationskolonne ausgewaschen und vom Uran getrennt wird. Die Trennung vom Thorium und den Spaltprodukten muß mittels anderer Verfahren, z. B. durch Extraktion mittels konzentrierter TBP-Lösung vorgenommen werden (s. I.-23-TBP und Thorex-Prozeß). [22]
engl.: interim-23-hexon-process
franz.: procéde interim-23-hexon
Lit.: s. Hexon.

Interim-23-TBP-Prozeß, amerikanische Bezeichnung für einen Thorium-Uran-Aufbereitungsprozeß zur Entgiftung von Thorium und Uran sowie Trennung von Thorium und Uran-233 (= 23, vgl. Indizierung) voneinander. Das *TBP (Tributylphosphat) wird in nichtaromatischen Paraffinen verdünnt. Der Prozeß bringt vorzügliche Entgiftungswerte für Uran-233 und Thorium. Uran wird mittels einer verdünnten TBP-Lösung aus einer wäßrigen, salpetersauren Lösung extrahiert, während das Thorium gemeinsam mit den Spaltprodukten in der wäßrigen Phase verbleibt. Das Uran-233 wird anschließend mit verdünnter Salpetersäure aus der organischen Phase ausgewaschen und in Ionenaustauschern, nach vorheriger Reinigung in

Kieselgurfiltern, angereichert. Aus den Ionenaustauschern wird das Uran mit Essigsäure ausgewaschen und als Peroxyd aus der essigsauren Lösung ausgefällt. Das Thorium, welches gemeinsam mit den Spaltprodukten entfernt wurde, wird aus dieser wäßrigen Lösung mittels konzentrierter 45prozentiger TBP-Lösung, die im Gegensatz zu verdünnten TBP-Lösungen Thorium gut zu extrahieren vermag, von den Spaltprodukten getrennt und in mehreren Reinigungszyklen weitgehend entgiftet. Als Salzagens wird salpetersaure Aluminiumnitratlösung benutzt. Um möglichst große Uran-233-Ausbeuten zu erhalten und um die Radioaktivität der Thoriumbrutstäbe möglichst weit abklingen zu lassen, müssen die Stäbe über 200 Tage gelagert werden, bevor man sie chemisch aufbereitet. In dieser Zeit zerfällt das Mutterelement des U-233, Pa-233 bis auf kleine Restbruchteile in U-233. Die Uran-233-Verluste sind unter diesen Umständen kleiner als 0,5 %. [22]

Lit.: Bruce, Fletcher, Hyman, Katz, Progress in Nuclear Energy, Serie III, Process Chemistry, Pergamon Press, London, 1956.

International Atomic Energy Agency, s. Internationale Atomenergie-Organisation.

Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO). Von der UN gegründete internationale Organisation zur Förderung, Koordinierung und Kontrolle der friedlichen Anwendung der Atomenergie einschließlich Forschung und Entwicklung. Besitzt eine Reihe von Sicherheits- und Kontrollbefugnissen, insbesondere auch über von ihr verwaltetes und weitergegebenes *spaltbares Material, jedoch nur auf Basis der freiwilligen Teilnahme der einzelnen Nationen an bestimmten Projekten. Sitz: Wien.

Erstmals vorgeschlagen vom amerikanischen Präsidenten Eisenhower im Dezember 1953, wurde die Bildung von der UN-Vollversammlung am 5. 12. 1955 beschlossen. Ein aus Vertretern von zwölf Ländern bestehender vorbereitender Ausschuß legte einer vom 20. 9. bis 26. 10. 1956 in New York tagenden Konferenz von 81 Staaten den Satzungsentwurf vor. Das Statut wurde von 70 Nationen unterzeichnet. Konstituierende Vollversammlung 1.–25. Okt. 1957 in Wien. Organe:

Gouverneursrat, 4 Hauptabteilungen unter einem Generaldirektor. [24]
engl.: International Atomic Energy Agency
franz.: Agence Internationale de l'Energie Atomique
Lit.: Die Atomwirtschaft 1, 383 (1956); 2, 353 (1957).

Inversion, chromosomale, ist die Umkehrung eines Teilstückes eines Chromosoms um 180° z. B. als Folge einer Bestrahlung. S. a. Mutation. [28]
engl.: chromosomal inversion
franz.: inversion chromosomique

Investierung, spezifische, s. Kaskade.

Ion. Jedes atomare System, also ein Atom, ein Molekül oder Molekülteil (Radikal), das mehr oder weniger Elektronen enthält als zu seiner Neutralisierung notwendig sind, das also eine (negative oder positive) überschüssige elektrische Ladung trägt, heißt ein I. Außerdem gibt es noch große I.n, welche durch Zusammenballung vieler Moleküle (Haufenionen, clusters) entstehen. Je nach der Art unterscheidet man also Atomionen, Radikalionen, Molekülionen und Haufenionen.
Je nach der Anzahl der überschüssigen oder fehlenden Elektronen spricht man von einfach, zweifach usw. geladenen I.n (in der Chemie auch von einwertigen, zweiwertigen usw. I.n). Im allgemeinen treten nur niedrige Ladungsstufen auf, da zur Erzeugung von I.n einer hohen Ladungsstufe eine hohe Energie erforderlich ist. Positive Atomionen können natürlich höchstens eine so hohe Ladungsstufe annehmen, daß der „nackte Kern" ohne Elektronen übrigbleibt; die I.n H^{+}, He^{++}, Li^{+++} sind also die jeweils höchstmöglichen positiven Ladungsstufen der betreffenden Atome.
I.n entstehen entweder durch *I o n i s a t i o n , wobei von einem neutralen Gebilde ein (oder mehrere) Elektronen abgetrennt werden, die sich nachträglich auch an andere neutrale Systeme anlagern können, oder aber durch D i s s o z i a t i o n , wobei ein neutrales Gebilde in zwei entgegengesetzt geladene (von denen jedoch keines ein einzelnes Elektron ist) zerlegt wird. In beiden Fällen ist eine Energiezufuhr notwendig, im ersten Fall die Zuführung der *Ionisierungsenergie, im zweiten die der Dissoziationsenergie.

I.n können sich in Gasen, in flüssigen und in festen Stoffen bilden. In Gasen entstehen Atomionen oder Molekülionen; auch Haufenionen spielen eine gewisse Rolle. Die I.n können durch die verschiedensten Arten von Energiezufuhr erzeugt werden, wie hohe Temperatur, Wellenstrahlen aller Art und Korpuskularstrahlen aller Art. Die Ionisation in Gasen durch Strahlungen bildet häufig das wichtigste Untersuchungsmittel dieser Strahlen. Ferner spielt die Ionisation in Gasen für jede Art von Gasentladungen eine wesentliche Rolle.

In Flüssigkeiten können I.n ebenfalls durch Strahlungen entstehen. In vielen Fällen tritt hier aber eine selbständige Dissoziation der Moleküle durch die molekularen Kräfte ein, insbesondere bei Lösungen gewisser Stoffe, der Elektrolyte, in Wasser und anderen Lösungsmitteln. Hier entstehen dann von selbst aus den gelösten Molekülen Atomionen oder Radikalionen (z. B. aus dem Schwefelsäuremolekül H_2SO_4 zwei Atomionen H^+ und ein zweifach geladenes Radikalion (SO_4^{--}) in meist sehr hoher Konzentration, während selbst in einem „hochionisierten" Gas die Anzahl der I.n stets nur einen winzigen Bruchteil der Anzahl der neutralen Moleküle ausmacht.

Feste Stoffe sind vielfach schon von vornherein aus I.n aufgebaut (s. Ionengitter). Ist dies nicht der Fall, so können auch in ihnen I.n durch Strahlungsionisation entstehen.

In allen Stoffen, in denen die I.n eine freie Beweglichkeit haben, also insbesondere in Gasen und Flüssigkeiten, wandern bei Anlegen eines elektrischen Feldes die positiven I.n zur Kathode, die negativen I.n zur Anode. Der Ausdruck „I." stammt von dem griechischen Wort für „wandern". Bei der Wanderung (s. Ionenwanderung) transportieren die I.n einen elektrischen Strom, dessen Stärke von der Stärke des Feldes, der Ionenbeweglichkeit und der Konzentration der I.n abhängt. [1]

engl.: ion *franz.: ion*

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1956.

Ionenaustauscher. I.A. sind solche Stoffe, deren eine Ionenart festgebunden, die andere mit entsprechenden in Lösung befindlichen Ionen austauschbar ist.

Ionen-
austauscher

Nach der auszutauschenden Ionenart unterscheidet man Kationen- und Anionen-A. Heute werden im wesentlichen Kunstharze mit Sulfosäure- oder Hydroxylgruppen (Kationen-A.) oder quarternären Aminogruppen (Anionen-A.) verwendet. Die früher viel benutzten A. auf Silikatbasis kommen kaum mehr zur Anwendung.

Durch gleichzeitige Anwendung von Kationen- und Anionen-A. ist es möglich, Wasser zu entsalzen, so daß sich eine Destillation erübrigt.

Die Affinität der Ionen zum A. steigt mit der Höhe der Ladung und der Ionengröße. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Konzentration am A. und der in Lösung ein, das durch Zugabe eines Komplexbildners stark zu Gunsten einer Seite verschoben werden kann. Auf diese Weise können zwei Ionenarten deren Gleichgewichtslage sehr verschieden ist, von einander getrennt werden. Läßt man z. B. Ni II- und CO II-Chloride durch eine Austauschersäule laufen, so erfolgt eine rasche Trennung. CO II, das Chloridkomplexe bildet, bleibt adsorbiert. Auch können eine Anzahl adsorbierter Ionen durch *Elution nacheinander abgetrennt werden.

Der Ionenaustausch an Kunstharzen bzw. Zeolithen ist für eine Anreicherung von Isotopen geeignet: das Isotopengemisch wird auf einem Anionen- bzw. Kationenaustauscher adsorbiert und durch geeignete Lösungsmittel eluiert.

In der Kesselspeisewasseraufbereitung ist die Verwendung von I.n seit langem als „Permutit"-Verfahren bekannt. Beim Kesselspeisewasser sollen die sog. Härtebildner, das sind Ca- und Mg-Ionen, gegen andere unschädliche wie Na-Ionen (Kochsalz) ausgetauscht werden. Für die Reaktionsgeschwindigkeit ist die Oberflächenentwicklung des Austauschers und der Diffusionsweg der auszutauschenden Ionen maßgebend. Ist der Austausch schwächer geworden, der Austauschweg der Diffusion also länger, muß der Austauscher regeneriert werden, indem man ihn mit einer Lösung der Austauschionen, bei der Kesselwasserreinigung mittels Permutit, d. i. Kochsalzlösung, spült.

Das Ionenaustauschverfahren hat ferner bei der Urangewinnung, bei der Aufarbeitung von Spaltprodukten und bei der Beseitigung unerwünschter radioaktiver Stoffe Bedeutung. [2, 3, 14]
engl.: ion exchanger
franz.: échangeur d'ions
Lit.: F. C. Nachhod, Ion Exchange, Theory and Application, New York, 1949.

Ionenbeweglichkeit, die konstante Wanderungs-Geschwindigkeit in cm/s, welche ein *Ion in irgendeinem gasförmigen oder flüssigen Stoff unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes von 1 V/cm annimmt. Die I. wächst mit der Ladung des Ions und ist außerdem um so höher, je kleiner das Ion und je niedriger die innere Reibung des Mediums ist. Daher sind die I.n in Gasen sehr viel höher als in Flüssigkeiten. Sogar in festen Stoffen gibt es eine, wenn auch äußerst geringe I. In Gasen von Normaldruck und Normaltemperatur liegt die I. mittelgroßer Ionen in der Größenordnung von 1 cm/s pro V/cm, in Flüssigkeiten bei Normaltemperatur ist sie rund 1000mal kleiner, z. B. in Wasser von 18 °C:

H^+	0,00327
OH^-	0,00180
Na^+	0,00045
Al^{+++}	0,00165
Cl^-	0,00068
SO_4^{--}	0,00142.

[1]

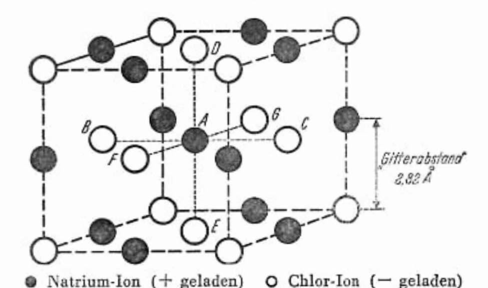
engl.: ion mobility
franz.: mobilité des ions

Ionenbindung, s. Ionengitter.
engl.: ion bond
franz.: liaison ionique

Ionendichte ist primär die Anzahl der Ionen eines Vorzeichens je cm^3, z. B. in einer Gasentladung. In der Kernphysik meint man gelegentlich mit I. auch die Anzahl der von e i n e m ionisierenden Teilchen beim Durchgang durch einen bestimmten Stoff je cm Weglänge erzeugten Ionenpaare. In diesem Sinn ist die I. dasselbe wie die spezifische *Ionisation. [1]
engl.: ion density
franz.: densité ionique

Ionendosis, s. Dosis.

Ionengitter. Im Gegensatz zum Atomgitter oder Molekülgitter ist ein I. ein Kristallgitter, das aus positiven und negativen Ionen aufgebaut ist. I. liegen bei den meisten Salzkristallen vor. Eines der bekanntesten Beispiele, das Steinsalzgitter (NaCl), zeigt die Abb. Jedes Na^{+}-Ion ist hier von sechs gleichberechtigten Cl^{-}-Ionen und jedes Cl^{-}-Ion von sechs gleichberechtigten Na^{+}-Ionen als Nachbarn umgeben, so daß es nicht mehr



● Natrium-Ion (+ geladen) ○ Chlor-Ion (− geladen)

möglich ist, ein Na^{+}-Ion mit einem b e s t i m m t e n Cl^{-}-Ion begrifflich zu einem Molekül zusammenzufassen. Die Bindung im I. entspricht jedoch weitgehend der heteropolaren Bindung im Molekül. Den größten Teil der Bindungsenergie (hier Gitterenergie) liefert das C o u l o m b sche Potential der Ionenladungen. [1]
engl.: ion lattice
franz.: réseau ionique

Ionennest, s. Nest.

Ionenquellen. I. nennt man alle Einrichtungen, die laufend möglichst zahlreiche Ionen derselben Art zur Erzeugung von Ionenstrahlen herstellen. Grundsätzlich kann jede Art von Gasentladung als I. dienen. Als besonders ergiebig haben sich besondere Arten von Bogenentladungen erwiesen. Teilweise werden auch Elektronen herangezogen, die einer Glühkathode entstammen und durch ein elektrisches Wechselfeld oder ein konstantes Magnetfeld zu öfterem Hin- und Herlaufen gezwungen werden, wobei sie die Atome des Gases wirksam ionisieren. Die I. muß der Beschleuni-

gungsapparatur, in welcher die erzeugten Ionen ihre hohe Energie erhalten sollen, angepaßt sein. Sie enthält meist Gas von einigen Millimetern Druck, während in der Beschleunigungsapparatur Hochvakuum herrscht. Da die Ionen durch eine feine Öffnung in den Beschleunigungsraum eintreten müssen, strömt auch Gas in diesen und muß laufend durch sehr wirksame Pumpen weggeschafft werden. [1]

engl.: ion sources

franz.: sources d'ions

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Ionenradius. So wenig wie einem Atom (s. Atomradius) läßt sich einem Ion in Strenge ein fester Radius zuschreiben. Man kann jedoch, ähnlich wie bei den Atomen, den Ionen ungefähre Radien zuordnen, aus denen sich ihre gegenseitigen Abstände in *Ionengittern so errechnen, als wenn sie starre Kugeln mit diesen Radien wären. Die so definierten Radien nennt man I.n. Für die einfach positiven Alkali-Ionen z. B. von Lithium bis zum Cäsium erhält man Werte von 0,6 bis 1,7 Å, für die einfach negativen Halogenionen vom Fluor bis zum Jod Werte von 1,3 bis 2,2 Å. Wie die Atomradien haben auch die I.n nur eine bedingte Genauigkeit. [1]

engl.: ionic radius *franz.: rayon ionique*

Lit.: J. d'Ans u. E. Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, 2. Aufl., Springer, Berlin, 1949.

Ionenschlauch. In Geiger-Müller-Zählrohren werden die Gasmoleküle in der Nähe einer dünnen drahtförmigen Anode durch die Elektronen durch Stoß ionisiert. Die dabei freiwerdenden Elektronen wandern infolge ihrer um Größenordnungen größeren Beweglichkeit schneller zur Anode ab, als die gebildeten Ionen. Dadurch bildet sich ein I. um die Anode, der die Feldstärke in der Nähe der Anode herabsetzt und damit die Stoßionisation teilweise oder ganz verhindert. Wird zur Löschung der Entladung benutzt. [6]

engl.: ion layer, ion hose

franz.: nuage ionique

Ionenwanderung, die im Mittel gleichförmige Bewegung von Ionen in Gasen oder Flüssigkeiten (in geringem Ausmaß auch in festen Stoffen) unter dem Ein-

fluß eines elektrischen Feldes. S. a. Ionenbeweglichkeit. Die I. hängt von der Ionenmasse ab. Daher kann die I. zur Trennung von Isotopen benutzt werden. Die elektrolytische I. ist zur Anreicherung von Isotopen sowohl bei Salzen, als auch bei wäßrigen Lösungen – zum Teil in Form einer Gegenstromelektrolyse – und Metallen in geschmolzenem und festem Zustand (s. Häffnereffekt) verwendet worden. In Salzen und Lösungen kann eine Anreicherung sowohl der Anionen als auch der Kationen stattfinden. Die Anreicherung wird durch den Masseneffekt

$$\mu = \left[\frac{\Delta w}{w} \Big/ \frac{\Delta m}{m}\right] = -\frac{1}{2}\,\frac{m}{M}\,\frac{1}{M + M/M'}\,U$$

bestimmt. w^+ und w^- sind die Relativgeschwindigkeiten der positiven und negativen Ladungsträger gegeneinander, also $\Delta w/w = (\Delta v/v)\,U$ (v^+ und v^- sind die Geschwindigkeiten der positiven und negativen Ladungsträger relativ zum Gitter, $U^+ = v^+/w^+$ und $U^- = v^-/w^-$ die Überführungszahlen, m ist die Isotopenmasse, M bzw. M' sind charakteristische Massen, welche die Masse des beweglichen Teilchens enthalten bzw. nicht enthalten). Die Masseneffekte in Salzen und wäßrigen Lösungen sind negativ, in Metallen positiv.

Die elektrolytische Überführung der leichten Isotope zur Anode in geschmolzenen Metallen (Häffner-Effekt) wurde durch die Annahme gedeutet, daß im Metall zwei Arten von Ionen vorhanden sind, bewegliche und relativ unbewegliche. Die leichten Isotope wandern schneller zur Anode als die schweren, weil ihre Beweglichkeit relativ zu den unbeweglichen Ionen größer ist als die der schweren Isotope. [1, 14]

engl.: ion migration

franz.: migration des ions

Ionisation (auch I o n i s i e r u n g). Unter der I. eines Atoms oder Moleküls versteht man das Wegreißen eines Elektrons durch Zuführen der Ionisierungsenergie in irgendeiner Form, also zunächst immer die Erzeugung eines positiven *Ions. Andererseits versteht man aber auch unter der I. eines Gases (evtl. auch einer Flüssigkeit oder eines festen Stoffes) die Erzeu-

gung von Ionen p a a r e n, vor allem durch eine Strahlung irgendwelcher Art, wobei ebenfalls zunächst positive Ionen gebildet werden, die losgerissenen Elektronen sich aber an neutrale Moleküle anlagern, wodurch zu jedem positiven Ion auch ein negatives entsteht.

Die vier wichtigsten Möglichkeiten der I. sind ähnlich wie bei der Anregung: Hohe Temperatur, Elektronenstoß, Stoß bewegter Ionen und Wellenstrahlung. [1]

engl.: ionization

franz.: ionisation

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1956.

Ionisation, spezifische (auch differentielle Ionisation, Ionisierungsstärke). S. I. nennt man die Anzahl von Ionenpaaren (s. Ionisation), welche durch ein rasch bewegtes, geladenes Teilchen (Elektron oder Ion) pro cm seines Wegs in einem Gas gebildet werden. Die s. I. hängt außer von der Natur und der Dichte des Gases und von der Ladung der geladenen Teilchen wesentlich von deren Geschwindigkeit ab, bei gegebener Geschwindigkeit dagegen n i c h t von ihrer Masse. Je höher die Geschwindigkeit, d. h. auch die Energie des Teilchens, desto g e r i n g e r ist seine s. I. Dies läßt sich grob so erklären, daß ein sehr rasches Teilchen die Atome zu rasch durchquert, um genügend Zeit zu haben, ein Elektron abzutrennen.

Ein α-Teilchen etwa ionisiert also, in dem Maße wie es langsamer wird, immer stärker, und erst kurz vor dem Ende seiner Reichweite nimmt die s. I. wieder ab, eine Abhängigkeit, die durch die sog. *B r a g g sche Kurve gegeben wird.

Wegen der Geschwindigkeitsabhängigkeit ist bei g l e i c h e r E n e r g i e die s. I. eines Teilchens um so geringer, je leichter es ist (da es dann höhere Geschwindigkeit hat). So ist z. B. in Luft von Normalbedingungen bei 1 MeV Energie die s. I. eines Elektrons ca. 50, diejenige eines Protons dagegen rund 8000 und diejenige eines α-Teilchens sogar über 60 000 Ionenpaare pro cm Weglänge. Bei 10 MeV Energie sind die entsprechenden Zahlen 45 (kaum verändert gegen 1 MeV, da die Geschwindigkeit des Elektrons

von 1 MeV auf 10 MeV kaum mehr steigt), 1000 und 16 000. [1]

engl.: specific ionization franz.: ionisation spécifique

Lit.: St. Meyer u. E. Schweidler, Radioaktivität, 2. Aufl., Teubner, Leipzig, 1927. – W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Ionisationsbremsung. Wenn ein geladenes Teilchen eine Materieschicht durchsetzt, so stößt es mit den Atomen oder Molekülen dieser Schicht zusammen. Dabei können diesen Elektronen entrissen werden: Es werden δ-Elektronen (s. δ-Strahlen) erzeugt und die Moleküle ionisiert. Dabei wird die kinetische Energie des Teilchens allmählich aufgezehrt. Das Teilchen wird also mehr und mehr abgebremst. Diese Art des Energieverlustes heißt I. im Gegensatz etwa zur Bremsstrahlung. [7]

engl.: ionization stopping

franz.: ralentissement par ionisation

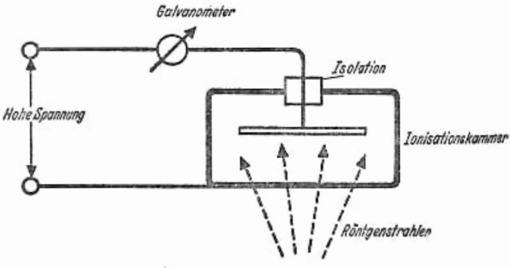
Ionisationsdichte, Zahl der Ionenpaare im cm³. [7]

engl.: ionization density franz.: densité d'ionisation

Ionisationsenergie, svw. Ionisierungsenergie.

engl.: ionization energy franz.: énergie d'ionisation

Ionisationskammer. Eine I. ist ein mit Luft oder einem anderen Gas gefülltes, geschlossenes Gefäß, in welchem sich isoliert zwei Elektroden befinden. Als eine Elektrode dient meist die metallene Gefäßwand selbst, so daß nur noch e i n e isoliert eingeführte „Innenelektrode" notwendig ist (s. Abb.). Die Größe



der I. ist je nach Verwendungszweck sehr verschieden, von einigen Kubikmillimetern bis zu vielen Litern; die Gasfüllung hat meist Atmosphärendruck, in manchen Fällen aber auch verminderten oder erhöhten Druck.

Die I. dient zur Messung der Intensität einer Wellenstrahlung oder Korpuskularstrahlung mittels der durch sie in der Gasfüllung der Kammer erzeugten *Ionisation. Man legt an die Elektroden der I. eine so hohe Spannung, daß der Sättigungsstrom erreicht wird, und mißt diesen entweder mit einem empfindlichen Galvanometer oder, falls er dazu zu gering ist, durch die Entladung oder Aufladung eines Elektrometers oder mittels eines Röhrenverstärkers. Die häufigste Anwendung findet die I. zur Messung der Intensität von Röntgenstrahlen und der kosmischen Strahlung.
Da die Empfindlichkeit der I. sich so weit steigern läßt, daß sie in Verbindung mit einem Verstärker schon auf die von e i n e m raschen Teilchen erzeugten Ionen anspricht, kann sie auch zur Zählung von Teilchen verwandt werden. Sie wird auch als M o n i t o r g e r ä t benutzt. Legt man sie in einen Strahlengang, so kann bei gleichbleibender Anzeige des in der I. fließenden Stromes z. B. ein Vergleich der Eichwerte von Dosismessern zeitlich nacheinander stattfinden. [1, 28]
engl.: ionization chamber
franz.: chambre d'ionisation
Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Ionisationskammer, kompensierte, Ionisationskammeranordnung zur Messung des Neutronenflusses in Anwesenheit von γ-Strahlung. Man baut in dieselbe Hülle eine Kammer, die für Neutronen empfindlich ist (also z. B. Bor als Gas oder an den Wänden enthält) und eine Kammer, die nur für γ-Strahlung empfindlich ist. Der Neutronenfluß und damit auch die Reaktorleistung ist der Differenz der Anzeige beider Kammern proportional. [19]
engl.: compensated ion chamber
franz.: chambre d'ionisation compensée

Ionisationskammer, luftäquivalente, nennt man eine *Ionisationskammer, deren Ionisationsraum mit Luft gefüllt ist, und deren Wände aus Luftwandmaterial (Ionisationskammer mit luftäquivalenten Wänden) bestehen. [28]
engl.: air-wall ionization chamber
franz.: chambre d'ionisation équivalent de l'air

Ionisationskammer, offene, bezeichnet eine I. ohne Begrenzung des Ionisationsraumes, d. h. wandlose I. [28]
engl.: free air ionization chamber
franz.: chambre d'ionisation sans paroi

Ionisationskern. Ein durch Ionisation erzeugter, also aus einem Gasion bestehender Kondensationskern für Wasserdampf, insbesondere in der Wilsonschen Nebelkammer. [1]
engl.: ionization kernel
franz.: noyau d'ionisation.

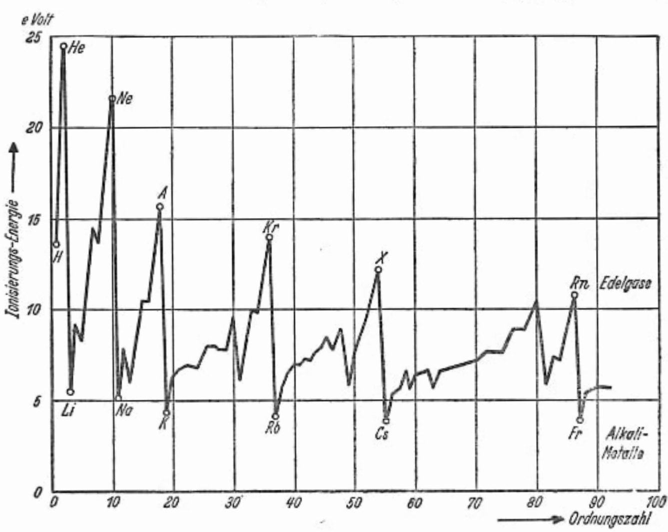
Ionisationsstrom (einer Ionisationskammer). Der Strom, der durch die Bewegung von Ionen und Elektronen zwischen den Elektroden einer Ionisationskammer hervorgerufen wird. [6]
engl.: ion current
franz.: courant d'ionisation

Ionisationszähler nennt man eine *Ionisationskammer oder ein Zählrohr, bei denen der Spannungsstoß, der infolge der Ionisation der Teilchen auf der Meßelektrode entsteht, über einen Proportionalverstärker einem registrierenden Oszillographen oder gegebenenfalls einfach einem Zähler zugeführt wird. [28]
engl.: G-M-counter
franz.: compteur G-M.

Ionisierungsenergie (auch Ionisierungsarbeit) heißt diejenige Energie, welche zur Ionisation eines Atoms oder eines Moleküls, d. h. zur Abtrennung eines Elektrons aus dessen Elektronenhülle (s. Atombau) notwendig ist. Gewöhnlich versteht man unter I. die zur Abtrennung des am leichtesten ablösbaren („äußersten") Elektrons erforderliche Energie; man kann jedoch auch von der I. für ein inneres Elektron (z. B. durch Röntgenstrahlen) sprechen. Die I. für ein bestimmtes Elektron stellt gleichzeitig die obere Grenze der Reihe der Anregungsenergien dieses Elektrons dar. Die I. wird meist gemessen durch die Spannung, welche ein Elektron frei durchlaufen muß, um diese Energie zu erlangen, um also im Elektronenstoß das betreffende Atom ionisieren zu können. Auf diese Weise in Volt ausgedrückt (eigentlich Elektronenvolt), heißt sie auch Ionisierungsspannung.

Ionisierungsenergie Trennt man bei einem bestimmten Atom der Reihe nach ein Elektron nach dem andern ab, so ist die I. für jedes weitere Elektron höher. So sind z. B. für die sechs Elektronen des Kohlenstoffatoms die I.n der Reihe nach ca. 11, 24, 46, 64, 390, 490 eV (der große Sprung von der 4. zur 5. I. zeigt, daß mit dem 5. abgetrennten Elektron eine neue Elektronenschale, die K-Schale, angegriffen wird). Für die innersten Elektronen (K-Schale) der schwersten Atome steigt die I. bis rund 100 000 eV.

Die I. des äußersten Elektrons eines Atoms, also die gewöhnliche I., zeigt in ihrem Verlauf mit der Ordnungszahl der Atome besonders deutlich den periodischen Verlauf, der dem Schalenaufbau der Elektronenhülle entspricht (s. Abb.). Sehr ausgeprägte Minima



der I. liegen bei den Alkaliatomen (niedrigste I.: Cäsium und Francium mit je 3,9 V). Ebenso ausgeprägte Maxima liegen bei den Edelgasatomen (höchste I.: Helium mit 24,5 V). [1]

engl.: ionization energy *franz.: énergie d'ionisation*

Lit.: W. Finkelnburg, Atomphysik, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1956.

Ionisierungsfunktion. Ähnlich wie die Anregungsfunktion oder Anregungswahrscheinlichkeit läßt sich auch die Wahrscheinlichkeit der Ionisation in Abhängigkeit von der einem Atom oder Molekül zugeführten Energie angeben. Diese Abhängigkeit heißt I. Die Kurve der I. sieht ähnlich aus wie die Anregungsfunktion; sie beginnt bei der Ionisierungsenergie und durchläuft auch ein meist ziemlich flaches Maximum, das jedoch bei höherer Energie liegt als bei der Anregung. [1]
engl.: ionization function
franz.: fonction d'ionisation

Ionisierungsspannung, s. Ionisierungsenergie.
engl.: ionization voltage
franz.: tension d'ionisation

Ionisierungsstärke, s. Ionisation, spezifische.

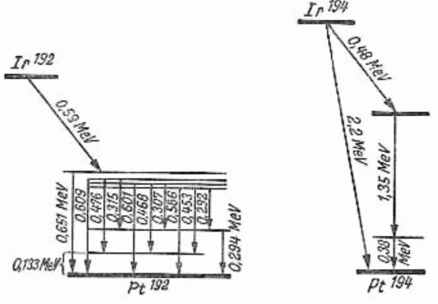
Ionium ist ein besonderer Name für das Isotop 230 des Thoriums, das in der Uran-Radium-Reihe als Zerfallsprodukt des Urans II auftritt und durch seinen eigenen Zerfall das Radium entstehen läßt. Das I. ist ein α-Strahler mit einer Halbwertszeit von 76 000 Jahren. [1]
engl.: ionium *franz.: ionium*

ipm, Abk. für Impulse (zählbare Ereignisse) pro Minute. [16]
engl.: cpm

ips, Abk. für Impulse pro Sekunde. [16]
engl.: cps

Iridium 192 und 194

Iridium 192 und 194. Von den beiden radioaktiven



Zerfallsschemata des Iridium 192 und 194

Isotopen ist in der Isotopentechnik ^{192}Ir wichtiger. Es weist ein reichhaltiges Gammaspektrum auf, dank dessen das Isotop für nicht zu dicke Materialien (0,7 bis 70 mm Stahl) als Strahlquelle zur *Grobstrukturuntersuchung angewandt wird. Die für technische Bestrahlungsanlagen etwas kurze Halbwertszeit des ^{192}Ir wird durch die bei *Neutronenaktivierung des natürlichen Ir erreichbare hohe spezifische Aktivität aufgewogen (Sättigungsaktivität bei einem Neutronenfluß von 10^{13} n cm^{-2} s^{-1}: 320 Curie/g).

^{194}Ir, ebenfalls ein komplexer Beta- und Gammastrahler, besitzt 19 Stunden Halbwertszeit, die hinsichtlich der Anwendbarkeit der Isotope in einem guten Verhältnis zur Halbwertszeit des Ir^{192} steht. [16]

engl.: iridium *franz.: iridium*

Isobare. In der Kernphysik sind I. Kerne mit gleicher (abgerundeter) Massenzahl, also gleicher Anzahl von Nukleonen, dagegen verschiedener Ordnungszahl, also verschiedener Anzahl von Protonen (und damit auch von Neutronen) im Kern. Beispiel: $^{17}_{7}N^*$, $^{17}_{8}O$ und $^{17}_{9}F^*$ sind I. (der Stern bedeutet radioaktive Kerne). Alle drei haben 17 Nukleonen, jedoch der Stickstoffkern 7 Protonen und 10 Neutronen, der Sauerstoffkern 8 Protonen und 9 Neutronen und der Fluorkern 9 Protonen und 8 Neutronen. [1]

engl.: isobars *franz.: isobares*

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1957.

Isobarensätze, Erfahrungssätze über das Vorkommen stabiler Isobare. Sie lauten:

1. Stabile Isobare unterscheiden sich stets mindestens um zwei Einheiten der Ordnungszahl. Beispiel: $^{130}_{52}Te$ — $^{130}_{54}X$ — $^{130}_{56}Ba$; die Kerne $^{130}_{53}J$ und $^{130}_{55}Cs$ sind radioaktiv, der Kern $^{130}_{51}Sb$ ist überhaupt nicht bekannt. Von diesem Satz gibt es einige Ausnahmen.

2. Alle stabilen Kerne gerader Massenzahl haben auch gerade Ordnungszahl, d. h. eine gerade Anzahl von Protonen und eine gerade Anzahl von Neutronen, meist mit mehreren Isobaren. Von diesem Satz gibt es vier Ausnahmen bei den leichtesten Elementen: $^{2}_{1}H$, $^{6}_{3}Li$, $^{10}_{5}B$ und $^{14}_{7}N$.

3. Es gibt keine stabilen Isobare ungerader Massenzahl u n d ungerader Ordnungszahl. Dies gilt ausnahmslos.

Alle I. lassen sich theoretisch begründen. [1]

engl.: isobaric laws

franz.: lois des isobares

Lit.: S. Flügge u. J. Mattauch, Kernphysikalische Tabellen, Springer, Berlin, 1942.

Isodosenkurven, Kurven, die in einem bestrahlten Körper die Orte gleicher Strahlendosis verbinden und damit die örtliche Verteilung der Strahlung sichtbar machen. [17]

engl.: isodose curves

franz.: diagramme des isodoses

Isomerie. In der Chemie versteht man unter I. die Tatsache, daß es Verbindungen gibt, deren Moleküle aus denselben Atomen bestehen, die aber trotzdem verschiedene Eigenschaften haben. Man muß annehmen, daß in den Molekülen dieser „isomeren" Verbindungen die Atome v e r s c h i e d e n a n g e o r d n e t sind. Zum Beispiel:

$CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$

n-Butan

$$\begin{array}{c} \quad\; CH_3 \\ \quad\;\, | \\ CH_3-CH \\ \quad\;\, | \\ \quad\; CH_3 \end{array}$$

In-Butan

Auch bei strahlenchemischen Zersetzungen zeigen sich Unterschiede.

Ganz entsprechend gibt es eine I. in der Kernphysik, wenn zwei Kerne zwar gleiche Anzahl von Protonen und Neutronen, aber in verschiedener Anordnung enthalten. S. Kernisomerie. [1]

engl.: isomerism

franz.: isomérie

Isomorphie. Isomorphe Substanzen haben im festen Zustand dieselbe Kristallstruktur. Sind auch die Größen der Gitterbausteine nahezu gleich, so bilden diese Substanzen miteinander eine lückenlose *Mischkristallreihe. So kann z. B. ein Radiumion in einem

Radiumsulfatkristall beliebig durch ein Bariumion ersetzt werden, da die Sulfate beider Metalle isomorph sind, und das Radiumion dem Bariumion chemisch sehr ähnlich ist. [4]
engl.: isomorphism
franz.: isomorphie

Isotone heißen solche Atomkerne, die gleiche Neutronenzahlen aufweisen. [7]
engl.: isotones
franz.: isotones

Isotope. I. sind Kerne mit gleicher Ordnungszahl, jedoch verschiedener Massenzahl (Nukleonenzahl), z. B. $^{20}_{10}Ne$ und $^{22}_{10}Ne$. I. enthalten gleichviel Protonen, jedoch eine verschiedene Anzahl von Neutronen. Da die Ordnungszahl den chemischen Charakter des aus dem Kern gebildeten Atoms bestimmt, also das chemische Element, sind I. immer Vertreter desselben Elementes und durch chemische Methoden nicht (oder kaum) voneinander zu unterscheiden.
Die Tatsache, daß ein chemisches Element n i c h t aus lauter gleichartigen Atomen zu bestehen braucht, sondern ein Gemisch mehrerer I. sein kann, wurde zuerst im Gebiet der natürlich radioaktiven Elemente entdeckt, wo sich z. B. Radium und Mesothorium, Radium D und Blei usw. als I. erwiesen (S o d d y , 1909). Bei nichtradioaktiven Elementen fanden J. J. T h o m s o n und A s t o n 1913 zuerst am Neon, daß es aus zwei I.n von der Massenzahl 20 und 22 besteht. A s t o n fand dann in den folgenden Jahren eine große Zahl von I.n bei fast allen Elementen. Seit der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität ist die Zahl der I. um die künstlich radioaktiven I. erweitert worden. Heute kennen wir zu den 102 verschiedenen Elementen über 300 stabile und rund 700 radioaktive I. Zwar besitzt nicht jedes Element mehrere stabile I., wohl aber jedes Element mehrere der Untersuchung zugängige I. überhaupt (nach heutiger Kenntnis mindestens drei). Das Zinn hat die meisten stabilen I., nämlich zehn mit Massenzahlen von 112 bis 124. Am meisten I. überhaupt sind beim Xenon bekannt, nämlich 25, darunter neun stabile.

Bei den schwereren Elementen unterscheiden sich die Massenzahlen der verschiedenen I. selten um mehr als 10 %. Dagegen sind bei den leichten Elementen die relativen Unterschiede viel größer, besonders bei Helium mit den vier I.n der Massenzahl 3, 4, 5 und 6 (die beiden ersten stabil) und Wasserstoff mit den drei I.n der Massenzahl 1, 2 und 3 (die beiden ersten stabil). Deren Trennung ist daher leichter.

Die sicherste Unterscheidung der stabilen I., die auch gleich ihre Massenzahlen zu messen gestattet, gelingt mit dem *Massenspektrographen. Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer wichtiger Methoden, vor allem aus den *Isotopieeffekten der Spektren. Ebenso gibt es eine größere Anzahl von Methoden zur Trennung der I. im technischen Ausmaß (s. Isotopentrennung), so daß wir heute schon über viele I. in reinem Zustand verfügen.

In der Natur kommen jene Elemente, von denen es mehrere stabile I. gibt, stets als Isotopengemisch vor. Das Mischungsverhältnis ist nicht vollkommen konstant. Abgesehen von den Fixsternatmosphären, in denen es begründete Ausnahmen von der Konstanz des Mischungsverhältnisses gibt, schwankt dieses auch bei irdischen Vorkommen in geringem, eben nachweisbarem Maß. Als gewogener Mittelwert aus den Isotopengemischen der einzelnen Isotope ergibt sich deshalb ein Atomgewicht, das geringen Schwankungen unterworfen ist. Das chemische *Atomgewicht wird auf das Isotopengemisch des Sauerstoffs bezogen, das ebenfalls je nach Herkunft der Probe Schwankungen zeigt. Die physikalische Atomgewichtsskala (s. ME) bezieht sich auf das Sauerstoffisotop ^{16}O, dessen Maße gleich 16,000 gesetzt wird.

Mehrere I. können in vergleichbarer Menge vertreten sein, wie z. B. beim Kupfer (69 % ^{63}Cu und 31 % ^{65}Cu); häufig ist aber ein I. ganz überwiegend, die anderen nur in Spuren vorhanden, wie etwa beim Sauerstoff (99,76 % ^{16}O, 0,04 % ^{17}O und 0,20 % ^{18}O). [1, 14]

engl.: isotopes *franz.: isotopes*

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958. – J. Mattauch u. A. Flammersfeld, Isotopenbericht, Verl. der ZS. f. Naturforschung, Tübingen, 1949.

Isotope, radioaktive

Isotope, radioaktive sind instabile I., die sich nach statistischen Gesetzen unter Aussendung von Korpuskeln (α-, β-, γ-Teilchen) umwandeln.
Man unterscheidet zwischen natürlichen (z. B. Radium, Thorium, Uran) und künstlich r. I. (z. B. Jod, Phosphor).
Charakteristisch für jedes r. I. ist die Art des Zerfalls bzw. die Art der Strahlung. [28]
engl.: radioactive isotopes
franz.: isotopes radioactifs

Isotope, schwere. Bei der Neutronenbestrahlung von Brennstoff (Spaltstoff und fruchtbares Material) werden zwei Gruppen von neuen Stoffen erzeugt: die *Spaltprodukte und die s. I. Die letzteren entstehen hauptsächlich durch (n, γ)-Prozesse mit nachfolgenden radioaktiven Zerfällen. Die s. I. sind z. T. *spaltbar, z. T. bilden sie unangenehme Reaktorgifte. Alle s. I. sind radioaktiv. (S. Isotopentabelle im Anhang.) [12]
engl.: higher chain products, heavy isotopes
franz.: isotopes lourds

Isotopenaustausch, chemischer Prozeß, bei dem Atome des gleichen Elements mit verschiedener Masse in zwei verschiedenen Molekülen miteinander die Plätze tauschen. Das Gleichgewicht einer solchen Austauschreaktion ist durch die relativen Massen der zwei Atome beeinflußt, z. B.

$$T_2 + C_6H_6 = C_6TH_5 + TH . \qquad [18]$$

engl.: isotope exchange
franz.: échange des isotopes

Isotopengewicht (Massenwert). Während das *Atomgewicht eines chemischen Elementes im allgemeinen nur einen Durchschnittswert darstellt, bezeichnet man die Atom-Masse eines bestimmten Isotops des Elementes, bezogen auf das Sauerstoffisotop $^{16}O = 16{,}0000$ als I. oder Massenwert. Die I.e werden vor allem mit dem *Massenspektrographen bestimmt, neuerdings auch mit Hilfe von *Energietönungen von Kernprozessen. Sie erreichen teilweise eine Genauigkeit von fast 10^{-6}. Die I.e ergeben sich mit großer Annäherung als ganzzahlig, was daran liegt, daß alle Kerne aus einer ganzen Zahl von Protonen und Neu-

tronen zusammengesetzt sind, die untereinander fast gleiche Masse haben, und daß die Massenänderung infolge der Bindungsenergie (*Massendefekt) sehr klein ist.
Die I.e der leichtesten stabilen Atome gibt die folgende Tabelle:

$^{1}_{1}H$	1,008 146	$^{9}_{4}Be$	9,015 0
$^{2}_{1}H$	2,014 744	$^{10}_{5}Be$	10,016 1
$^{3}_{2}He$	3,017 01	$^{11}_{5}B$	11,012 8
$^{4}_{2}He$	4,003 88	$^{12}_{6}C$	12,003 82
$^{6}_{5}Li$	6,016 95	$^{13}_{6}C$	13,007 50
$^{7}_{5}Li$	7,018 20		

S. a. ME. [1]
engl.: isotopic mass *franz.: masse isotopique*

Isotopenlaboratorium, Arbeitsräume, in denen durch räumliche und instrumentelle Ausstattung eine strahlensichere Handhabung radioaktiver Isotope gewährleistet ist. Zu I.n gehören z. B. radiochemischer Raum, Meßraum, Isotopenaufbewahrungsraum, außerdem Fernbedienungsgeräte, Strahlungsüberwachungsanlagen, Strahlungsmeßplätze. [16]
engl.: isotopic laboratory
franz.: laboratoire à isotopes

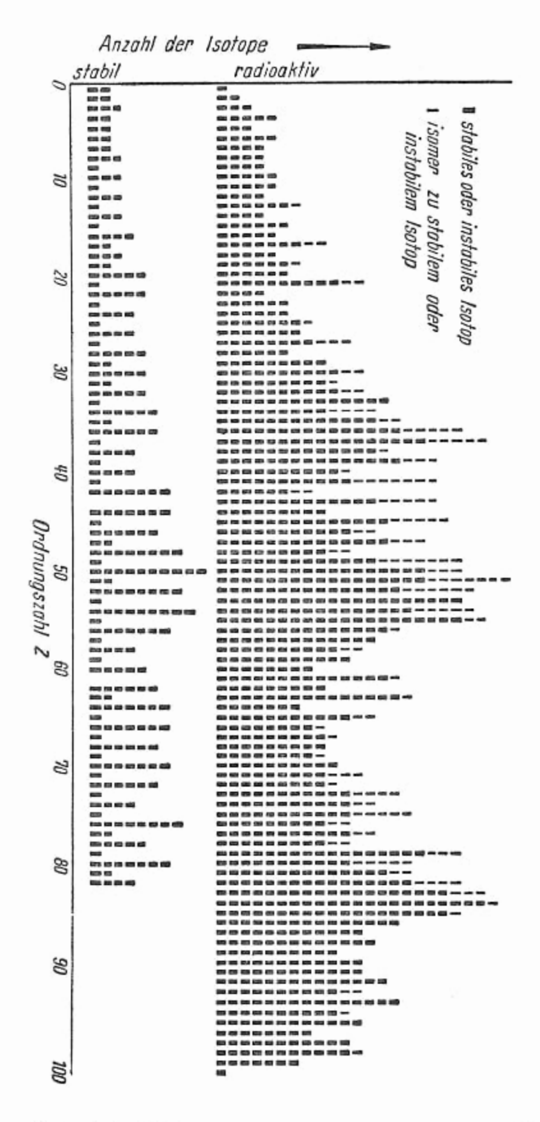
Isotopenregel, der Erfahrungssatz, der besagt, daß es nie mehr als zwei stabile Isotope ungerader Massenzahl zu einem Element gibt, und daß sich zwei solche Isotope in ihrer Massenzahl um zwei Einheiten unterscheiden, daß ferner ein Element ungerader Ordnungszahl kein stabiles Isotop gerader Massenzahl besitzen kann. Der erste Teil der I. hat als Ausnahme Zinn, welches drei stabile Isotope ungerader Massenzahl (115, 117 und 119) besitzt, der letzte Teil vier Ausnahmen: Wasserstoff ($^{2}_{1}H$), Lithium ($^{6}_{3}Li$), Bor ($^{10}_{5}B$) und Stickstoff ($^{14}_{7}N$). S. a. Isotopensätze. [1]
engl.: isotope rule *franz.: règle des isotopes*

Isotopenschleuse zur Trennung von Isotopen. Die I. verwendet die von der Bestimmung von Geschoßgeschwindigkeiten (bzw. der Geschwindigkeitsverteilung der Molekularstrahlen) her bekannte Methode: ein von einem Molekularstrahlofen ausgehender Strahl

durchsetzt zunächst eine rotierende Blendenanordnung, durchfliegt einen evakuierten Raum und trifft auf einen ebenfalls rotierenden Schlitz, der so gegen die Blendenanordnung versetzt ist, daß nur Teilchen mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit durchgelassen werden. Da die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung masseabhängig ist, läßt sich eine teilweise Entmischung der leichten und schweren Komponente erzielen. [14]
engl.: isotope sluice
franz.: écluse à isotopes

Isotopentechnik befaßt sich mit der Herstellung, Handhabung und Anwendung der ca. 1000 bekannten Isotope, insbesondere der ca. 650 radioaktiven Isotope, deren Häufigkeitsverteilung über der chemischen Ordnungszahl und der Halbwertszeit in den beiden Abb. wiedergegeben sind.
Künstlich radioaktive Isotope werden aus in der Natur vorkommenden Isotopen durch Kernreaktionen mit Hilfe von Kernreaktoren, Teilchenbeschleunigungsanlagen und Neutronenquellen erzeugt. In vielen Fällen müssen die Isotope angereichert werden. Bei der Handhabung radioaktiver Isotope ist die biologische Gefährdung durch die Strahlung der Isotope zu berücksichtigen. Dies führt zum Teil zu schwierigen und umständlichen Manipulationstechniken und kostspieligen Einrichtungen (Abschirmung, Fernbedienungsanlagen, Schutzanzüge). Die nötige Sicherheit gegen Bestrahlung der Arbeiter, gegen Kontamination oder Inkorporation von radioaktiven Substanzen ist in der Regel nur in besonders eingerichteten Isotopenlaboratorien gegeben.
Anwendungsmöglichkeiten von Isotopen:
1. Kernchemisches Verhalten von Isotopen kann sich von den übrigen Isotopen beträchtlich unterscheiden, so daß mit Reinisotopen besonders wirkungsvoll Kernreaktionen ausgeführt werden können (z. B. mit ^{2}H, ^{10}B, ^{235}U).

Abb. 1. Zahl der stabilen und der radioaktiven Isotope in Abhängigkeit von der chemischen Ordnungszahl



Anzahl der Isotope
stabil
radioaktiv
stabiles oder instabiles Isotop
isomer zu stabilem oder instabilem Isotop
Ordnungszahl Z
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

2. Die Strahlung der radioaktiven Isotope wird durch Materie verändert (gestreut, absorbiert), so daß aus dieser Veränderung auf die Geometrie, Struktur und Zusammensetzung des angestrahlten oder durchstrahlten Materials geschlossen werden kann (Foliendickenmessung, Grobstrukturuntersuchung, Strukturanalyse).
3. Radioaktive Strahlung verändert verschiedene Stoffeigenschaften und leitet chemische Reaktionen ein (Strahlungssterilisation, Vernetzung von Kunststoffen durch Strahlung, Strahlungskorrosion, Strahlungspolymerisation).

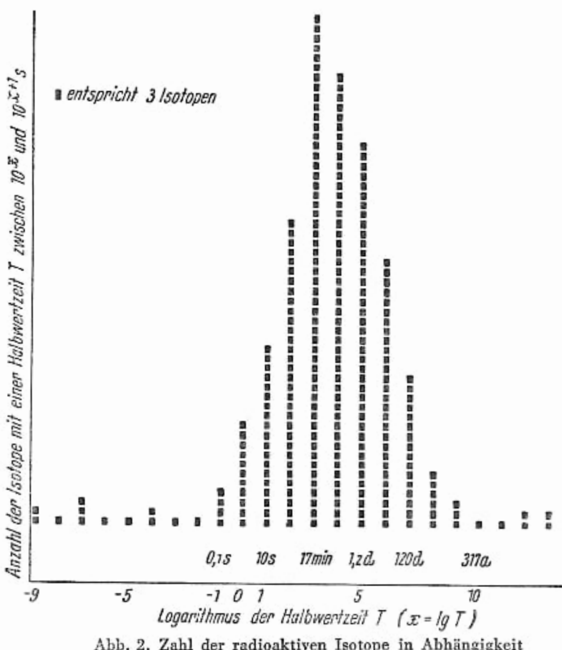


Abb. 2. Zahl der radioaktiven Isotope in Abhängigkeit von der Halbwertszeit

4. Durch Beimischung eines radioaktiven Isotops kann ein chemisches Element gekennzeichnet werden, da die chemischen Eigenschaften der Isotope eines chemischen

Elements sich nicht unterscheiden. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, Stoffwanderungen in komplizierten Systemen zu verfolgen (Leitisotopenmethode).

5. Besonders weit verbreitet ist der Gebrauch der Isotope in der chemischen Analyse. Radiochemische Verfahren sind Aktivierungsanalyse, Isotopenverdünnungsanalyse, Radiochromatographie, radiometrische Analyse.

6. Die Strahlung der Isotope hat biologische Wirkungen (Strahlungsmedizin, Strahlungsmutationen, Züchtung von neuen Pflanzen). [16]

engl.: isotope technology
franz.: isotope technique

Lit.: G. Hevesy, Radioactive Indicators, Interscience Publ., New York, 1948. – E. Broda u. T. Schönfeld, Radiochemische Methoden der Mikrochemie, Springer, Wien, 1955. – G. B. Cook u. J. F. Duncan, Modern Radiochemical Practice, Clarendon Press, Oxford, 1952.

Isotopentrennung, Verfahren zur Abtrennung einzelner Isotope aus den natürlichen Isotopengemischen. Sie können im allgemeinen nicht auf chemischen Methoden beruhen, da die Isotope eines Elementes sich chemisch gleich verhalten, sondern müssen einen der physikalischen *Isotopieeffekte heranziehen. Da diese alle sehr geringfügig sind, ist die I. eine sehr schwierige und mühsame Aufgabe. Meist kann keine vollständige Trennung, sondern nur eine Anreicherung eines Isotops erreicht werden, die erst durch häufig wiederholte Anwendung des Trennverfahrens ein einigermaßen reines Isotop liefert.

Die radikalste Methode zur I., die als einzige unter günstigen Bedingungen vollständige Trennung ergibt, ist die durch die verschieden große elektrische und magnetische Ablenkbarkeit der Isotope im Ionenstrahl, also mittels einer Art *Massenspektrographen. Sie ist während des Krieges in großem Ausmaß bei der Entwicklung der Atombombe zur Abtrennung des spaltbaren Uranisotops ^{235}U benutzt worden (s. Calutron). Das Verfahren ist heute veraltet und wird nur noch für Spezialprobleme benutzt.

Bei allen anderen Methoden zur Isotopentrennung, die auf dem verschiedenen statistischen Verhalten der

leichten und schweren Isotope beruhen und von geringen Primäreffekten ausgehen, wendet man entweder das Restprinzip oder das Vervielfachungsprinzip an. Das Restprinzip besteht in einer Einengung des Ausgangsvolumens V_0 des Isotopengemisches auf ein Restvolumen V unter ständiger Wahrung des Gleichgewichtes des Einzelprozesses; das Vervielfachungsprinzip besteht in einer vielfachen Wiederholung des Einzelprozesses durch Hintereinanderschaltung vieler Glieder.

Beide Prinzipien sind prinzipiell auf jeden Einzelprozeß anwendbar. Das Restprinzip wird bevorzugt angewendet bei der Destillation, Desorption, Elektrolyse, der Gaschromatographie, bei der Gaszentrifuge in Form einer Verdampfungszentrifuge; das Vervielfachungsprinzip wird im allgemeinen verwendet bei der Rektifikation, Diffusion, bei chemischen Austauschverfahren, der thermisch gesteuerten Gegenstromzentrifuge, Elektromigration, Gegenstromelektrolyse, Gleichstrom-Glimmentladung, beim Ionenaustausch, Knudseneffekt, der Oberflächenwanderung, Thermodiffusion (in Gasphase und flüssiger Phase), Trenndüse, dem Zweitemperaturprozeß.

Auch die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der isotopischen Zusammensetzung eines Moleküls und katalytische Effekte werden für eine Anreicherung angewendet. [1, 14]

engl.: isotope separation

franz.: séparation des isotopes

Lit.: s. Isotope.

Isotopenverdünnungsanalyse. s. Verdünnungsanalyse. [3]

engl.: isotopic dilution analysis

franz.: analyse par dilution

Isotopieeffekte, alle Effekte, die auf dem unterschiedlichen Verhalten der Isotope eines Elementes beruhen. Da infolge der Gleichartigkeit der Elektronenhülle (s. Atombau) der Isotope diese praktisch gleiche chemische Eigenschaften haben, gibt es kaum chemische I., abgesehen vom Wasserstoff, wo der große relative Massenunterschied zwischen ^1H und ^2H auch merkliche chemische Unterschiede bedingt.

Dagegen gibt es eine große Anzahl I. auf den verschiedensten physikalischen Gebieten, die jedoch alle sehr geringfügig sind und oft nur mit feinen Hilfsmitteln entdeckt werden können. Hierher gehören alle makroskopischen Effekte, die auf der verschiedenen Masse und dadurch bedingten verschiedenen Beweglichkeit der isotopen Atome beruhen, wie etwa die Unterschiede in der Diffusionsgeschwindigkeit, die *Thermodiffusion u. a. Auch die verschieden große Ablenkbarkeit im Ionenstrahl gehört hierher. Andere I. beruhen auf den geringfügigen Änderungen der Elektronenhülle der Atome durch die Unterschiede in der Kernmasse oder Kerngröße und äußern sich darin, daß die Lage der Spektrallinien der Atomspektren der verschiedenen Isotope eines Elementes nicht genau identisch ist (Isotopieverschiebung). Wieder andere I. treten in den Molekülspektren infolge der je nach der Masse der Kerne verschiedenen Frequenz der Molekülschwingungen auf.
Viele I. lassen sich entweder zur Erkennung und Unterscheidung, oder aber zur praktischen Abtrennung der Isotope (s. Isotopentrennung) ausnützen. [1]
engl.: isotope effects
franz.: effets isotopiques

Isotopieverschiebung, s. Isotopieeffekte.
engl.: isotope shift
franz.: déplacement spectral isotopique

Isotron. Apparatur zur elektromagnetischen *Isotopentrennung. Beruht darauf, daß *Ionen mit verschiedener Masse, die alle auf die gleiche *kinetische Energie beschleunigt wurden, unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen. Durch Synchronisation der Wechselspannung an einem Ablenkgitter mit der Impulsfrequenz der *Ionenquelle können die Ionen nach ihrer Geschwindigkeit getrennt abgesondert werden. [24]
engl.: isotron *franz.: séparateur isotron*

ISPRA-1. Bezeichnung für den ersten italienischen *Forschungsreaktor, einen *Schwerwasser-Materialprüfreaktor des Typs *CP-5. Zu liefern von ACF Industries (USA) für Errichtung im neuen Atomforschungsinstitut in Ispra, Provinz Varese, bis 1958. [24]

Iterationsverfahren zur Lösung der *Reaktorgleichung können in verschiedenster Form angewendet werden. Geht man speziell von der *Integralgleichung der Neutronendiffusion aus, die im monoenergetischen, isotropen Fall in der Form

$$N(\mathfrak{r}) = \int N(\mathfrak{r}')K(\mathfrak{r}' \to \mathfrak{r})\,\mathrm{d}V'$$

geschrieben werden kann, so hat man zunächst unter dem Integral eine plausibel erscheinende Näherungsfunktion $N_1(\mathfrak{r})$ für die Neutronendichte einzusetzen und erhält durch Integration auf der linken Seite eine Funktion $\overline{N}_1(\mathfrak{r})$. Es läßt sich zeigen, daß $\overline{N}_1(\mathfrak{r})$ eine bessere Näherung der exakten Lösungen darstellt als die ursprünglich gewählte Funktion N_1. Man hat nun $\overline{N}_1$ in das Integral einzusetzen usw. [13]
engl.: iteration method *franz.: méthode d'itération*

Izod-Kerbschlagprobe. Ein Werkstoffprüfverfahren zur Bestimmung der *Kerbschlagzähigkeit, das besonders in den angelsächsischen Ländern angewendet wird. Im Unterschied zur *Charpyschen Pendelschlagprobe wird die Probe einseitig bis zum Kerbquerschnitt fest eingespannt und durch einen Schlag des Izod-Pendelhammers gegen das freie Ende zerschlagen. Als Kerbschlagzähigkeit wird die Schlagarbeit bezogen auf den Kerbquerschnitt (in mkg/cm²) angegeben, die sich aus der Differenz zwischen Fallhöhe des Pendelhammers und Steighöhe nach dem Schlag berechnen läßt. [4]
engl.: Izod test
franz.: essai au choc sur l'entaille Izod

J

JEEP. Abk. für Joint Establishment Experimental Pile, den ersten gemeinsam von Norwegen und Holland gebauten *Forschungsreaktor. *Schwerwassertyp. Natürliches Uran als Brennstoff, Schweres Wasser als Moderator und Kühlmittel. Leichtes Wasser und Luft als sekundäre Kühlmittel. Wärmeleistung ursprünglich 100 kW, später 350 kW. In Betrieb seit 30. 7. 1951 im Forschungsinstitut *JENER, Kjeller, Norwegen. [24]

JEN, Abk. für *Junta de Energia Nuclear. [24]

JENER. Abk. für Joint Establishment for Nuclear Energy Research, das gemeinsam vom norwegischen *Institutt for Atomenergi und holländischen *Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie betriebene Atomforschungsinstitut in Kjeller, Norwegen, mit Forschungsreaktor *JEEP. [24]

Jod, radioaktives, findet man als Spalt- und als Zerfallsprodukt in den Kernbrennstoffen von Reaktoren. Bei plattierten, umhüllten Brennstoffelementen werden die Spalt- und Zerfallsprodukte an dem Austreten in den Moderator oder das Kühlmittel durch die Umhüllung gehindert. Erst bei Zerstörung oder Undichtwerden der Umhüllung treten die radioaktiven Spalt- und Zerfallsprodukte in den Moderator oder das Kühlmittel aus. Das auftretende Radiojod wird, da seine Strahlung sehr diskrete Energiespektren besitzt, mit Vorliebe zur Brennstoffelement-Schadensdetektion herangezogen. Diese kann in Anionenaustauschern der Reaktor-Reinigungskreisläufe vorgenommen werden.

J. tritt in den Abgasen von Aufbereitungsprozeßanlagen auf und läßt sich mittels Absolut-Aerosolfilter nicht herausfiltrieren. Man entfernt es durch Wäsche mit kaustischer NaJ-Lösung oder durch Abscheidung als Silberjodit in $AgNO_3$-getränkten Raschingringfiltern. Im letzteren Fall müssen die Abgase auf 300 °C erhitzt werden. Die Raschingringfilter werden nach Verbrauch des Silbernitrates durch Tränken mit frischer $AgNO_3$-Lösung regeneriert.

Jod 131 tritt als kurzlebiges Spaltprodukt bei der Urankernspaltung auf (2,8 %). Wegen seiner Bedeutung in der medizinischen Strahlentherapie wird es bei den chemischen Kernbrennstoffaufbereitungsprozessen von den übrigen Spaltprodukten getrennt und der Medizin zugeführt.

Das ^{131}J wird mit überhitzem Wasserdampf aus den Primärlösungen der Aufbereitungsprozesse ausgetrieben und in nachgeschalteten Kondensatoren auskondensiert.

Die Halbwertszeit des ^{131}J beträgt 8,04 d.

J o d 1 3 2 entsteht bei der Spaltung im wesentlichen über ^{132}Te (Anteil 4,5 %)

$$^{235}\mathrm{U}\,(\mathrm{n, f})\,^{132}\mathrm{Te} \xrightarrow[77\,\mathrm{h}]{\beta^-} {}^{132}\mathrm{J}\,.$$

Die Halbwertszeit des ^{132}J beträgt 2,26 h. – Beide Strahler zeigen verzweigten Beta-Zerfall mit Gammakaskaden. [16, 22]
engl.: radioactive iodine
franz.: iode radioactif

Johannit. Sekundäres, grünes Uranmineral mit 67,72 % UO_3-Gehalt. [24]

Junta de Energia Nuclear, Name der staatlichen Atomenergiekommission in den Ländern Spanien, Portugal. Abk.: JEN. [24]

K

K-Faktor, Dosisleistung eines Gammastrahlers von 1 mC Aktivität in 1 cm Abstand in R ö n t g e n pro Stunde.
Der *K*-F. ist für jeden Gammastrahler verschieden, entsprechend den verschiedenen, beim Zerfall ausgestrahlten Quanten. Dient zur Berechnung der Dosisleistung in bestimmtem Abstand vom Präparat. Der *K*-F. ist

$$K \approx 5{,}5 \cdot f \cdot E \; [\mathrm{r\,h^{-1}\,mC^{-1}}] \quad [0{,}1 \leq E \leq 3{,}0\ \mathrm{MeV}]$$

mit E in MeV als Emissionsenergie der Quanten und f als Bruchteil der Zerfälle, die Quanten ausstrahlen. [6]
engl.: K-factor
franz.: facteur K

K-25, K-27 usw., Codebezeichnungen für Isotopentrennanlagen in Oak Ridge, Tennesee, USA. [7]

Kadmium, s. Cadmium.

Käfigeffekt. Bei der Dissoziation eines Moleküls innerhalb einer festen oder flüssigen Phase können die Dissoziationsprodukte wegen der Hinderung durch andere Moleküle nicht schnell abdiffundieren, so daß eine Rückreaktion eintritt. [18]
engl.: cage effect
franz.: effet de cage

Kalifornium. Das sechste Transuran mit der Ordnungszahl 98; chemisches Symbol Cf. Das Isotop 244 wurde 1950 von S e a b o r g und Mitarbeitern in Berkeley in Kalifornien (daher der Name) durch Beschuß von Curium 242 mit energiereichen α-Teilchen erhalten. Es ist ein α-Strahler von 45 Minuten Halbwertszeit. Inzwischen sind noch neun weitere Isotope bis hinauf zum Cf 254 aufgefunden worden. Das langlebigste unter ihnen ist das Cf 249, ein α-Strahler von fast 500 Jahren Halbwertszeit. Besonders interessant ist das Cf 254, das schwerste der bis jetzt erhaltenen Cf-Isotope, das ohne nachweisbare α-Strahlung mit einer Halbwertszeit von 85 Tagen durch spontane Spaltung zerfällt. [1]
engl.: californium *franz.: californium*

Kalimeßgerät mißt die ^{40}K-Strahlung von Salz- bzw. Gesteinsproben. Daraus kann der Kaligehalt ermittelt werden. [6]
engl.: potassium detector
franz.: détecteur à potassium

Kalium (K). Alkalimetall mit der Dichte 0,86; Ordnungszahl 19, Atomgewicht 39,1, Schmelzpunkt 63,5 °C, Siedepunkt 770 °C. Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen $\sigma_a = 2{,}0$ b, $\Sigma_a = 0{,}025$ cm^{-1}. Kristallstruktur: kubisch raumzentriert.
K. ist ein an der Luft, in Wasser und in Berührung mit sehr vielen anderen Stoffen unbeständiges, weiches Metall. Wegen der niedrigen Schmelztemperatur, der guten Wärmeleitfähigkeit und des geringen Absorptionsvermögens für Neutronen kommen Legierungen des K., besonders mit *Natrium, als Kühlmittel für Reaktoren in Betracht.
Das natürlich vorkommende K. besteht zu 0,0119 % aus dem radioaktiven Isotop $^{40}_{19}$K, das eine Halbwertszeit von $1{,}3 \cdot 10^9$ a besitzt.

$$^{40}_{19}\mathrm{K} \xrightarrow[1{,}3 \cdot 10^9\,\mathrm{a}]{89\,\%\ \beta^-} {}^{40}_{20}\mathrm{Ca} \qquad ^{40}_{19}\mathrm{K} \xrightarrow[11\,\%\ EC]{1{,}3 \cdot 10^9\,\mathrm{a}} {}^{40}_{18}\mathrm{A}$$

[3, 4]

engl.: potassium *franz.: potassium*

Kalium 40 und 42. ^{40}K ist ein in der Natur mit 0,0119 % Häufigkeit vorkommendes radioaktives Isotop, dessen β,γ-Strahlung z. B. in der chemischen Analyse und in Kalibergwerken für Kaligehaltsbestimmung ausgenutzt wird. ^{42}K wird bei Bestrahlung natürlichen Kaliums mit langsamen Neutronen gebildet. Bemerkenswert ist die hohe β-Energie von 3,6 MeV.

Strahlungsdaten: [16]

	^{40}K	^{42}K
Erzeugung:	natürl. Vorkommen	^{41}K (n, γ)
Halbwertszeit:	1,3 · 10^{9} Jahre	12,5 h
Betastrahlung:	1,36 MeV	2,0 MeV 18 % 3,6 MeV 82 %
Gammastrahlung:	1,47 MeV	1,53 MeV 18 %

Kalkuranglimmer, s. Uranit.

Kaltpressen. 1. Technisches Formgebungsverfahren, das bei Raumtemperatur und unterhalb der Rekristallisationstemperatur durchgeführt wird.
2. (In der *Pulvermetallurgie.) Herstellung eines Presslings aus Pulver bei Raumtemperatur ohne Wärmebehandlung. [4]
engl.: cold pressing
franz.: 1. estampage à froid, 2. pressage à froid

Kaltreaktivität, abkürzende Bezeichnung für denjenigen Reaktivitätswert, der sich auf Grund von Steuerungen oder Umladungen in jedem Augenblick ergeben würde, wenn alle leistungsabhängigen Reaktivitätsänderungen (z. B. Temperatureffekt, Vergiftung) entfielen. Die K. ist bis auf langfristige Brennstoffänderungen und Vergiftungen praktisch mit der in den kalten Reaktor eingeprägten *Steuerreaktivität identisch. Sie kann deshalb, wenn man von evtl. aktiv an der Kettenreaktion beteiligten späteren Einbauten absieht, höchstens den Wert der anfänglichen Überschußreaktivität des Reaktors annehmen. [9]
engl.: cold reactivity *franz.: réactivité froide*

Kaltschweißung. 1. Verbindungsverfahren, wobei zwei Werkstücke ohne Zufuhr von Wärme, also lediglich durch Druck zusammengeschweißt werden (*Schweißen).
engl.: cold welding *franz.: soudure à froid*

2. Ungenügende Verbindung zweier Metallschichten in einem Gußstück, die gewöhnlich durch zu niedrige Gießtemperatur verursacht wird. [4]
engl.: cold shot
franz.: décollement

Kaltverformung. Plastische Verformung eines Werkstoffes unterhalb der *Rekristallisationstemperatur. Mit zunehmendem Verformungsgrad verfestigt sich der Werkstoff und das Gefüge erhält eine Vorzugsorientierung (*Textur). Infolge dieser Verfestigung ist es gelegentlich notwendig, zwischen aufeinanderfolgenden K.n Rekristallisationsglühungen einzuschalten. [4]
engl.: cold forming
franz.: façonnage à froid

Kalzinierung. Es handelt sich um eine Teiloxydation von Erzen (Rösten). Die Oxydation von Uran oder Uranylnitrat zu UO_3 wird als Uran-Kalzinierung bezeichnet (s. a. Oxydausschlackung). [22]
engl.: calcination
franz.: calcination
Lit.: R. G. Geier, Continuous Calcination Equipment for Converting UNH to UO_3, HW 49 652.

Kalzium 45, einziges in der Isotopentechnik gebräuchliches Isotop des in Erden und Gesteinen weit verbreiteten Elements Ca. Das Isotop wird einesteils als weicher Betastrahler von 0,25 MeV Energie ohne Gammastrahlung zur Durchstrahlung sehr dünner Folien, andernteils als *Leitisotop für biologische und chemische Untersuchungen angewandt. ^{45}Ca ($t_{1/2}$ = 152 d) wird gewöhnlich durch Bestrahlung des natürlichen Ca mit langsamen Neutronen über die Kernreaktion $^{44}Ca\,(n,\gamma)\,^{45}Ca$ gewonnen. Die dabei auftretenden weiteren Aktivitäten des ^{47}Ca ($t_{1/2}$ = 5,8 d), ^{49}Ca ($t_{1/2}$ = 8,5 min), ^{59}Sc ($t_{1/2}$ = 57 min) klingen bei Lagerung der bestrahlten Substanz rasch ab. [16]
engl.: calcium
franz.: calcium

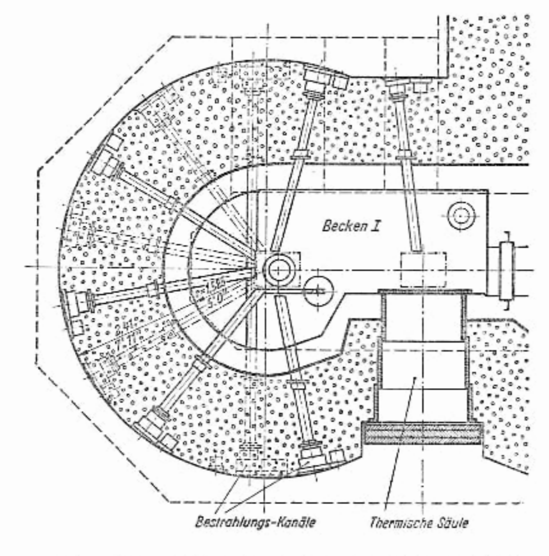
Kalzium-Alter, Altersbestimmung von Kalium-Mineralien auf Grund des Gehalts an Kalzium (Ca). Das natürliche Kalium hat die Isotope ^{39}K (93,1 %),

^{40}K (0,012 %), ^{41}K (6,9 %). Von diesen sind ^{39}K und ^{41}K stabil, während ^{40}K durch β-Zerfall in ^{40}Ca übergeht (Halbwertszeit $1{,}3 \cdot 10^9$ a). Der ^{40}K-Gehalt war also bei Ablagerung des K-Minerals größer als heute, und zwar um so größer, je weiter die Ablagerung zurückliegt. Da man aus der Kristallstruktur schließen kann, daß bei der Ablagerung kein Ca beigemischt war, ergibt der beobachtete Gehalt an ^{40}Ca die Zahl der seit Ablagerung zerfallenen ^{40}K-Kerne und über die bekannte Halbwertszeit die inzwischen verstrichene Zeitdauer. [7]
engl.: calcium age
franz.: âge de calcium

Kammer, gewebeäquivalente, *Ionisationskammer, in der die Materialien für Wände, Elektroden sowie das Füllgas so gewählt sind, daß eine Strahlung in der Kammer die gleiche Ionisation erzeugt wie in Gewebe.
Gewebeäquivalente Materialien sind besonders bei der Konstruktion von Ionisationskammern zur Dosimetrie von Neutronen wichtig. Durch Mischung verschiedener Substanzen kann man Stoffe erhalten, die annähernd die gleiche Zusammensetzung haben wie Gewebe ($C_5H_{40}O_{18}N$). [17]
engl.: tissue-equivalent ionization chamber
franz.: chambre d'ionisation équivalente aux tissus

Kämpe-Lorey-Platten (Abschirmstoff für bauliche Vorhaben) stellen eine Mischung von Schwerspat und Zement der Dichte 3,15 g/cm³ dar. Sie sind für Diagnostik- und Therapie-Strahlung hinsichtlich ihres Schutzwertes wesentlich günstiger als Beton oder Ziegelsteine. [28]
engl.: barium concrete blocks
franz.: briques (de béton) à la baryte

Kanal (s. Brennstoffkanäle). In heterogenen Reaktoren gibt es Kanäle für Brennstoff- und Regelstäbe sowie für Meß- und Experimentierzwecke (bei Forschungsreaktoren). Als K. werden ferner Bohrungen und Durchbrüche in der Abschirmung bezeichnet, welche zur Durchführung von Versuchen im Strahlungsfeld des Reaktors dienen. [8]



Grundriß eines Forschungsreaktors mit Bestrahlungskanälen

engl.: (reactor) channel
franz.: canal (dans le réacteur)

Kanalüberhitzung. Die zulässige mittlere Temperatur der wärmeabgebenden Flächen ist einer der wesentlichen Faktoren für die elektrische Leistung eines Reaktors. Sie wird von der maximal zulässigen Temperatur im Reaktor und der Differenz zwischen Mittelwert und Maximum der Temperatur bestimmt, welche sich aus einem physikalisch gegebenen Betrag und einem Unsicherheitsfaktor für die K. *(hot channel factor)* zusammensetzt. Letzterer ergibt sich aus den maßlichen, hydrodynamischen und thermischen Toleranzen. Zum Beispiel muß die Verformung der Brennstoffelemente unter dem Einfluß von Temperatur und Strahlung berücksichtigt werden. S. a. Kühlkanal, gefährdeter. [8]

engl.: hot channel effect
franz.: surchauffe d'un canal

Kanteneinriß. Risse, die beim Walzen an den Kanten eines Bleches entstehen. [4]
engl.: edge crack *franz.: déchirure de bords*

Kaolin ist bewährt als *Ionenaustauscher. In dieser Eigenschaft ist es für die Abfallkonzentrierung wichtig (s. Abfall, radioaktiver). [22]

KAPL, Abk. für *Knoll's Atomic Power Laboratory.

Karbid-Ausschlackung. Es handelt sich um einen Hochtemperatur-Brennstoffreinigungsprozeß mit Hilfe der Karbidbildung der Spaltprodukte und des Plutoniums in einer flüssigen Metall-Lösung von Uran. Es zeigt sich, daß die Spaltprodukte, vor allem Zirkon, eher in die Karbidform übergehen als das reaktionsträgere Uran. Diesem Umstand verdankt man, daß bei hohen Temperaturen eine partielle Reinigung des Urans von Spaltprodukten mittels der K.-A. möglich ist. [22]
engl.: carbid slagging
franz.: purification par formation de carbures
Lit.: s. Hexon.

von Kármán-Zahl (Ka), s. Ähnlichkeitsgesetze der Wärmeübertragung.
engl.: von Kármán-No.
franz.: nombre de Kármán

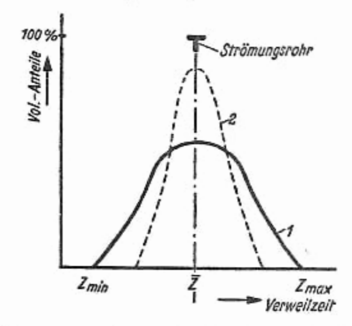
Karussellaufnahme, karussellartige Expositionsanordnung bei *Radiographien mit der Strahlquelle im Zentrum, s. *Panoramaaufnahme. [16]

karzinogen, svw. Krebs-erzeugend.
engl.: carcinogen *franz.: cancérigène*

Kaskade. 1. K. nennt man die Anordnung von mehreren *Reaktionsapparaten, z. B. Autoklaven oder Rührwerken hintereinander bei stetigem Durchlauf der Reaktionsstoffe. Die Notwendigkeit dazu kann der zu fordernden „Verweilzeit“ entspringen, d. h. der Zeit, die erforderlich ist, um die betreffende Reaktion durchzuführen, während der also die Reaktionspartner miteinander unter den Reaktionsbedingungen (Druck, Temperatur) in Berührung bleiben müssen, um ein optimales Ergebnis (Ausbeute) zu erzielen. Ihr grundlegender Mangel ist darin zu erblicken, daß bei größe-

ren Volumina der einzelnen, in Kaskade geschalteten Reaktionsgefäße die Verweilzeit der einzelnen Stoffteilchen der Reaktionspartner schlecht definiert ist, weil sie in den Gefäßen sehr verschiedene Wege zurücklegen können. Die Verweilzeiten lassen sich i. a. durch eine Glockenkurve ähnlich einer G a u ß schen Fehlerkurve darstellen. Wenn man die Zahl der Stufen bei festgehaltenem Gesamtvolumen vergrößert, nähert man sich mehr und mehr dem Grenzfall des Strömungsrohres (s. Reaktionsapparate) : Die Glockenkurve wird

Kaskade



enger und enger und damit die Verweilzeiten aller Teilchen einander gleich oder doch nahezu gleich.
Ein Beispiel für eine K.n-Anordnung ist eine Isotopentrennanlage.

Bei kleinen Elementareffekten der Anreicherung im Trennelement muß zur Erreichung eines großen Gesamttrennfaktors eine Hintereinanderschaltung einer großen Zahl von Trennelementen in einer Trenn-K. erfolgen. Ihre Aufgabe ist es, einen Zuflußstrom von Z Molen/s des Ausgangsmaterials mit dem Molenbruch n_0 in einen P r o d u k t i o n s s t r o m von P Molen/s mit dem Molenbruch n_P und einen A b f a l l s t r o m von A Molen/s mit dem Molenbruch n_A zu zerlegen. In der von Cohen wiedergegebenen Optimaltheorie der K., die zur Festlegung der günstigsten Betriebsbedingungen und zur Berechnung des geringsten Gesamtaufwandes führt, erzeugen sowohl die Einzelelemente als auch die Gesamt-K. Wertströme, wobei als Wert eines Materials der zu seiner Erzeugung erforderliche,

normierte Trennaufwand bezeichnet wird. In der optimalen K. ist der gesamte Wertstrom gleich der Summe der Werterzeugungen der Einzelelemente, d. h. es geht kein durch eine Trennwirkung erzeugter Wert durch Vermischen von Strömen mit verschiedenen isotopischen Konzentrationen verloren (ideale K.); für sie gilt:

$$\frac{\text{Gesamtwertstrom}}{\text{Gesamttrennaufwand}} = \frac{\text{Werterzeugung des Elementes}}{\text{Trennaufwand des Elementes}}$$

Die Wertströme sind die Produkte aus den Materialströmen und einer Wertfunktion, die für die einzelnen Trennelemente und die Gesamt-K. gilt; die Wertfunktion erfüllt die Bedingung, daß die Werterzeugung des Einzelelementes von der Konzentration des gewünschten Isotops unabhängig ist.
Das Trennelement teilt den zufließenden Strom von L Molen/sec mit dem Molenbruch n in einen angereicherten Strom von $\Theta \cdot L$ Molen/sec mit dem Molenbruch n' und einen abgereicherten Strom von $(1 - \Theta) \cdot L$ Molen/sec mit dem Molenbruch n'' (Θ = Schnitt, Abstreifverhältnis des Trennelementes).
Die Trennelemente werden in den Stufen nebeneinandergeschaltet, deren Hintereinanderschaltung die Gesamt-K. ergibt. Sie besteht aus der Anreicherungs- und der Abstreif-K., in welcher die Konzentration des gewünschten Isotops von ihrem natürlichen Wert herabgesetzt wird.
Die Werterzeugung des Einzelelementes ist durch ihr Trennpotential δU gegeben, welches durch den Strom L, den elementaren Trenneffekt

$$\varepsilon = \frac{n'(1 - n)}{n(1 - n')} - 1$$

und das Abstreifverhältnis Θ bestimmt wird; der Gesamtwertstrom ΔU ist gleich dem Produkt aus δU und der Zahl Z der Einzelelemente. Der Trennaufwand setzt sich aus dem Investitionsaufwand und dem Betriebsaufwand zusammen. Die Wirtschaftlichkeit eines Trennverfahrens ist durch die Aufwand/Wertverhältnisse (spezifischer Investitionsaufwand, spezifischer Leistungsaufwand) bestimmt.

Die optimale K. ist dreieckig, solange $n' - n$ als konstant angesehen werden kann. Bei großen Konzentrationsänderungen des gewünschten Isotops ist zu berücksichtigen, daß $n' - n$ von der Konzentration abhängt. Infolgedessen ist die Anreicherungs-K. gegenüber einem Dreieck nach innen eingezogen, die Abreicherungs-K. dagegen ausgeweitet. Bei hohen Stufenzahlen läßt sich die optimale Gestalt der K. zwar prinzipiell beliebig gut annähern, doch würde diese Staffelung viele verschiedene Trennelement- (und Pumpen-) typen erfordern. Praktisch wird sie durch eine Folge rechteckiger K.n ersetzt, die sich aus einer kleinen Zahl von Apparatetypen aufbauen läßt (Quadrierung der K.).

Von großer praktischer Wichtigkeit ist die Zeit, die bis zur Einstellung des Gleichgewichts in einer K. erforderlich ist (Relaxationszeit). Sie läßt sich aus der Geschwindigkeit abschätzen, mit der das Gleichgewicht erreicht wird.

2. K. im Sinne von Elektronen-K., s. Strahlung, kosmische und Schauer. [2, 14]

engl.: cascade *franz.: cascade*

Lit.: S. Kießkalt, Verfahrenstechnik, München, 1951. – K. Cohen, The Theory of Isotope Separation, New York, 1951.

Kaskadengenerator, Spannungsvervielfacher, ein Teilchenbeschleuniger zur stoßartigen Beschleunigung geladener Elementarteilchen. Beruht auf der Erzeugung einer hohen Gleichspannung (bis ca. 3 MV) durch ein (säulenförmig angeordnetes) System von Kondensatoren und zwischengeschalteten, als „Ein-Weg-Ventil" wirkenden Vakuumröhren. Jedes Kondensator-Ventil-System ist ein Spannungsverdoppler, wodurch eine Vervielfachung des Spitzenwertes der Ausgangs-Wechselspannung erreicht wird. Cockcroft und Walton erzielten 1932 mit einem derartigen von ihnen gebauten Beschleuniger die erste Kernumwandlung mit künstlich beschleunigten Elementarteilchen. [24]

engl.: cascade generator

franz.: générateur à cascade

Kasolit, sekundäres, gelblich-braunes Uranmineral mit 49,28 % UO_3-Gehalt. [24]

Katalysator. Man versteht darunter Stoffe, die thermodynamisch mögliche chemische Reaktionen auslösen oder beschleunigen, ohne sich dabei wesentlich zu verändern. In die Reaktionsgleichung geht der K. daher nicht ein. Durch den K. wird nur die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht, das Gleichgewicht aber nicht verändert. Kleine Mengen an K.n können gewaltige Quantitäten von reagierenden Stoffen beeinflussen. Der K. ist heute aus der praktischen Chemie nicht mehr wegzudenken. Einige Anwendungsgebiete: Die katalytische Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff am Platinkontakt, eine Reaktion, die bei der Rekombination der entstehenden Gase im wassergekühlten oder wassermoderierten Reaktor eine wesentliche Rolle spielt; die Herstellung von Schwefelsäure, Ammoniak, die Oxydation von Naphthalin zu Phtalsäure, die Chlorierung von Kohlenwasserstoffen in der chemischen Technik; die Kohlehydrierung sowie fast alle Polymerisations- und Kondensationsreaktionen in der Kunststoffchemie. [18]
engl.: catalyst
franz.: catalyseur

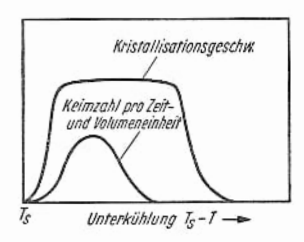
Katalysatorbett. Bei einem Homogenreaktor entstehen erhebliche Mengen Knallgas (etwa 13 l/min bei 50 kW). Dieses Knallgas wird katalytisch mit Platin zu Wasser verbrannt. Das Platin ist auf Aluminiumoxydtabletten (3 mm ⌀) aufgebracht. Das K. funktioniert nur dann, wenn es trocken ist. Deshalb ist eine Heizung eingebaut, die den K. trocknet und auf Betriebstemperatur bringt (etwa 100 °C). Bei höherer Leistung wird die Heizung ausgeschaltet, da bei der Verbrennung von Knallgas genügend Wärme entsteht, um die Temperatur zu halten. [19]
engl.: catalyst bed *franz.: lit catalytique*

Katarakt = γ (grauer Star) ist die Linsentrübung des Auges infolge Trübung des Eiweißes der Augenlinse. Das kann als Folge einer Strahleneinwirkung auf das Auge eintreten. Der Effekt ist wenig von der zeitlichen Dosisverteilung abhängig. Bei 10 % der Überlebenden in Japan, die sich während des Atombombenabwurfes weniger als 1000 m vom Boden-Null-

punkt entfernt befanden, entwickelten sich K. als Folge einer Neutronenstrahlung. Die wirksame Dosis beträgt ca. 50 n (100–125 rad). Die relative biologische Wirksamkeit von schnellen Neutronen hinsichtlich der Kataraktbildung wird mit etwa 14 angenommen. [28]
engl.: cataract *franz.: cataracte*

Kausalprinzip oder Kausalgesetz fordert die Existenz eines eindeutigen Zusammenhangs zwischen den Zuständen eines abgeschlossenen Systems (also ohne Eingriffe von außen) zu verschiedenen Zeiten. Seinen Inhalt kann man folgendermaßen darstellen: Ist der Zustand eines abgeschlossenen Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt vollständig bekannt, so kann man den Zustand des Systems in jedem früheren oder späteren Zeitpunkt grundsätzlich berechnen. Oder etwas spezieller: Wenn man Ort und Impuls (oder Geschwindigkeit) eines Massenpunktes zu einer bestimmten Zeit genau kennt, so kann man unter Beachtung der wirkenden Kräfte die Bewegung des Massenpunktes ausrechnen. Dieses K. ist in der klassischen Physik durchweg erfüllt. In der Quantenmechanik ist die vorausgesetzte Bedingung, nämlich die vollständige Kenntnis des Zustandes eines abgeschlossenen Systems in Raum und Zeit, wegen des bestehenden *Dualismus grundsätzlich nicht erfüllt. [7]
engl.: causal principle *franz.: principe de causality*

Keimbildung. Prozeß, der die Entstehung einer neuen Phase, z. B. das Auskristallisieren aus der Schmelze, einleitet. Die Zahl der pro Zeit- und Volumeinheit entstehenden Keime und die Kristallisations-



geschwindigkeit sind für das Gefüge der neu entstehenden Phase maßgebend; man kann es durch Zusatz von

Fremdkeimen beeinflussen (Kornfeinung). Da beim Entstehen der Keime eine nicht zu vernachlässigende Oberflächenenergie aufgebracht werden muß, können manche *Phasenumwandlungen weit unterkühlt bzw. überhitzt werden (z. B. Siedeverzug). [4]

engl.: nucleation

franz.: formation de germes

Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkunde, Springer, Berlin, 1950.

K-Einfang. Bei Atomen mit instabilen Kernen, die einen relativen Mangel an Neutronen haben, besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Elektron der K-Schale (s. Atombau) vom Kern „verschluckt" wird, wodurch dieser eines seiner Protonen in ein Neutron verwandelt und dadurch in einen Kern mit einer um eine Einheit niedrigeren Ordnungszahl übergeht. Diesen Prozeß nennt man K-E. Der entstehende Endkern ist derselbe, als ob der Kern ein Positron ausgeschleudert hätte. Nach außen macht sich der K-E. jedoch durch kein ausgeschleudertes Teilchen bemerkbar, sondern nur dadurch, daß nach der Umwandlung in der Elektronenhülle ein K-Elektron fehlt, was den Übergang eines äußeren Elektrons in diese Lücke und damit die Aussendung einer K-Röntgen-Strahlung veranlaßt. Diese Röntgen-Strahlung kann beobachtet werden. Unter den künstlich radioaktiven Stoffen ist der K-E. sehr häufig. Daneben tritt, wenn auch mit wesentlich geringerer Wahrscheinlichkeit, auch ein Einfang aus der L-Schale, ein L-Einfang, auf. [1]

engl.: K-capture *franz.: capture K*

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958.

Keloid, bindegewebige Narbengeschwulst, die auf der Haut sitzt und nur selten bösartiges Wachstum zeigt. [28]

engl.: keloid *franz.: chéloide*

Kennzahlen, dimensionslose, s. Ähnlichkeitsgesetze der Wärmeübertragung.

engl.: dimensionless ratios

franz.: nombres sans dimensions

Kerbschlagzähigkeit. Ein Werkstoffkennwert (in mkg/cm^2), der den Widerstand eines Werkstoffes gegen schlagartige Beanspruchung angibt. Die Bestim-

mung der K. (auch Kerbfestigkeit genannt) erfolgt nach *Charpy oder *Izod im Kerbschlagbiegeversuch an gekerbten Proben mit einem Pendelschlagwerk. [4]

engl.: notch impact stength
franz.: résilience
Lit.: DIN 50 115.

Kern. Nach dem erstmals 1911 von Rutherford aufgestellten *Atommodell besteht jedes Atom aus einem K. und einer Hülle von Elektronen (s. a. Atombau).
Der K. hat eine Ausdehnung von der Größenordnung 10^{-12} cm, $^1/_{10\,000}$ des ganzen Atomdurchmessers, und ist damit im Verhältnis zum ganzen Atom noch kleiner als die Sonne im Verhältnis zum Bahndurchmesser ihrer äußersten Planeten. Er enthält praktisch die ganze Masse des Atoms. Die Elektronenhülle besitzt nur 0,021 % (beim Uran) bis 0,054 % (beim Wasserstoff) der Masse des K.s. Außerdem trägt der K. stets eine positive elektrische Ladung von einer ganzen Zahl von Elementarladungen (Kernladungszahl), welche gleichzeitig die Ordnungszahl des betreffenden K.s im Periodischen System der Elemente angibt und beim neutralen Atom gleich der Anzahl der Elektronen in der Elektronenhülle ist.
Der K. eines Atoms ist, mit Ausnahme des K.s des gewöhnlichen Wasserstoffatoms, zusammengesetzt aus Protonen und Neutronen (s. Kernbau). Die Anzahl Protonen bestimmt die *Ordnungszahl, die Anzahl Nukleonen (Protonen und Neutronen zusammen) die *Massenzahl des K.s.
In der Schreibweise der Kernphysik wird jeder K. durch das Symbol des ihm zugehörigen chemischen Elementes gekennzeichnet, dem meist als unterer Index die Ordnungszahl, als oberer Index die Massenzahl angeheftet wird. $^{3}_{7}Li$ ist also ein K. der Ordnungszahl 3 (und deswegen dem chemischen Element Lithium, Li, zugehörig) und der Massenzahl 7. Er enthält drei Protonen und $7 - 3 = 4$ Neutronen.
Außer Masse und Ladung besitzt jeder K. einen mechanischen Drehimpuls (Spin), der Null oder ein halbzahliges oder ganzzahliges Vielfaches von $h/2\pi$ sein kann (h Planck sches Wirkungsquantum), sowie ein

magnetisches Moment (s. Kernmoment, magnetisches), welches in *Kernmagnetonen gemessen wird, jedoch kein ganzzahliges Vielfaches eines Kernmagnetons ist. Zudem besitzen viele K.e auch ein elektrisches *Quadrupolmoment und Momente höherer Ordnung, die teilweise auch schon experimentell bestimmt werden können.

Da ein K. bestimmter Protonenzahl, der also zu einem bestimmten Element gehört, noch verschiedene Neutronenzahl haben kann (*Isotope), gibt es nicht nur so viele verschiedene Kernarten, wie es verschiedene chemische Elemente gibt, sondern sehr viel mehr.

Bei diesen vielen verschiedenen Kernarten hat man zwischen stabilen K.n und *radioaktiven K.n zu unterscheiden. Die letzteren wandeln sich ohne äußeren Anlaß spontan in andere K.e um, und zwar in einem bestimmten zeitlichen Ausmaß, so daß immer jeweils nach Ablauf der *Halbwertszeit des betreffenden K.s die Hälfte der zu Anfang vorhandenen K.e umgewandelt ist.

Es gibt rund 300 verschiedene stabile K.e. Dagegen nimmt die Zahl der radioaktiven K.e, von denen nur ca. 40 in der Natur vorkommen, durch künstlich herbeigeführte Kernumwandlungen noch immer zu. Es gibt grundsätzlich keine Begrenzung ihrer Zahl, da ein K. mit gegebener Protonenzahl an sich beliebig viele Neutronen enthalten kann und nur immer instabiler wird, je weiter sich seine Zusammensetzung von der stabilen entfernt. Bei der Zahl der bekannten radioaktiven K.e handelt es sich also wesentlich um die Frage, bis zu welcher kürzesten Halbwertszeit herunter man äußerst instabile K.e experimentell feststellen kann. Die stabilen und natürlich radioaktiven K.e sind im Anhang zusammengestellt.

Alle K.e, stabile wie radioaktive, lassen sich durch äußere Eingriffe, insbesondere durch Beschießen mit energiereichen Teilchen, umwandeln. Dies ist auch der einzige Weg, wie man künstliche, in der Natur nicht vorkommende K.e erzeugen kann. Jede solche Umwandlung geht unter Aufnahme oder Abgabe einer ganz bestimmten Energie, der Energietönung des Kernprozesses, vor sich. Näheres s. Kernumwandlungen.

Der Zusammenhalt der K.e wird durch die *Kernkräfte bewerkstelligt. Ihnen entspricht eine negative Energie, die *Bindungsenergie, welche jeder K. gegenüber dem System seiner getrennten Bestandteile besitzt. Sie beläuft sich bei den schweren K.n auf über eine Milliarde Elektronenvolt und drückt sich in dem *Massendefekt der K.e aus. Die Änderungen der Bindungsenergie bei Kernumwandlungen treten als Energietönung in Erscheinung und können gegebenenfalls als *Kernenergie nutzbar gemacht werden. [1]
engl.: nucleus
franz.: noyau

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1957. – J. Mattauch u. A. Flammersfeld, Isotopenbericht, Z. f. Naturforschung, Tübingen, 1949. – Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen, I. Bd., 5. Teil, 6. Aufl., Springer, Berlin, 1952.

Kernabstand, der Abstand der Kerne der einzelnen Atome in einem Molekül oder auch im Kristallgitter. Er wird in Ångström-Einheiten gemessen. [1]
engl.: nuclear distance
franz.: distance des noyaux

Kernanregung. Ein Atomkern ist, ähnlich wie die Elektronenhülle eines Atoms, verschiedener *Energieniveaus fähig, von denen das tiefste, der Grundzustand, dasjenige ist, auf welchem sich der Kern normalerweise befindet, während die höheren Energieniveaus angeregte Zustände darstellen. Den Übergang der Kerne in solche angeregte Zustände bezeichnet man als K. Hierzu ist, ähnlich wie bei der Anregung in der Elektronenhülle, eine für jeden angeregten Zustand bestimmte Anregungsenergie erforderlich, die jedoch wegen der ganz anderen Energieverhältnisse im Kern millionenfach höher liegt als bei der Elektronenhülle. Die K. kann daher nur durch γ-Strahlen genügender Härte oder durch den Stoß sehr energiereicher Teilchen erfolgen. Auch bei *Kernumwandlungen entstehen die neuen Kerne häufig zunächst in angeregten Zuständen.

Angeregte Kerne gehen innerhalb äußerst kurzer Zeiten von selbst in den Grundzustand über, meist unter Aussendung der frei werdenden Energie in Form eines γ-Quants, oft auch in mehreren Stufen unter Aus-

sendung mehrerer γ-Quanten (*Kernspektrum). In manchen Fällen geht die Anregungsenergie auch an ein ausgeschleudertes Teilchen über; so kommen z. B. die *α-Spektren zustande.

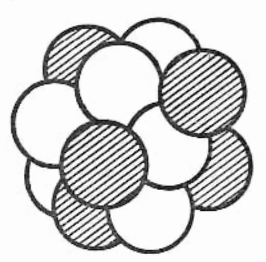
Auch können die isomeren Kerne (s. Kernisomerie) als eine Art angeregter Kerne betrachtet werden. Sie haben eine relativ lange Lebensdauer und gehen oft nicht ineinander, sondern durch *β-Zerfall in einen gemeinsamen Folgekern über. [1]

engl.: nuclear excitation
franz.: excitation du noyau

Kernbau. Alle Kerne sind aus Protonen und Neutronen aufgebaut mit Ausnahme des Protons selbst, das den Kern des Wasserstoffatoms bildet. Diese Erkenntnis stammt von Heisenberg und löste die ältere Auffassung ab, wonach die Kerne aus Protonen und Elektronen bestehen sollten.

Da nach der heutigen Erkenntnis im Kern keine Elektronen vorhanden sind, muß man annehmen, daß beim β-Zerfall der Kerne die Elektronen neu entstehen.

Die Protonen und Neutronen des Kerns müssen ziemlich eng gepackt angenommen werden. Da nämlich die *Bindungsenergie eines Kerns ziemlich unabhängig von der Größe des Kerns ca. 8 MeV pro Nukleon beträgt, können die den Zusammenhalt vermittelnden *Kernkräfte praktisch nur zwischen unmittelbaren



Nachbarn wirksam sein, so daß für den Kern ein ähnlicher Aufbau folgt wie der eines Flüssigkeitstropfens aus Molekülen (*Tröpfchenmodell), und man sich grob bildlich einen Kern etwa so vorstellen muß, wie die Abb. es zeigt.

Die Kernkräfte wirken sowohl zwischen zwei Protonen wie zwischen zwei Neutronen und auch zwischen einem Proton und einem Neutron auf kürzeste Entfernung i. a. stark anziehend; demgegenüber spielt die elektrostatische Abstoßung der Protonen untereinander eine zweitrangige Rolle.

Zu jeder Anzahl von Protonen gibt es eine ganz bestimmte Anzahl von Neutronen, für welche das aus beiden zusammengesetzte Gebilde die größte Bindungsenergie besitzt, also stabil ist. Dieses stabile Mischungsverhältnis liegt bei leichten Kernen durchweg in der Nähe von 1 : 1, da sich offenbar besonders gerne Proton-Neutron-Paare bilden und bei einer vollständigen „Absättigung" dieser beiden Arten gegeneinander die tiefste Energie erreicht wird. Dies rührt von dem sowohl für Protonen als auch für Neutronen gültigen P a u l i - Prinzip her, nach welchem ein Proton und ein Neutron mit sonst g l e i c h e n Quantenzahlen eingebaut werden können, zwei Protonen oder zwei Neutronen aber nicht. Bei schwereren Kernen macht sich die elektrostatische Abstoßung der Protonen dadurch bemerkbar, daß in den Gebilden niedrigster Energie die Protonenzahl gegenüber der Neutronenzahl zurückgedrängt wird und das Verhältnis Neutronen : Protonen von 1 : 1 bei den leichtesten Kernen auf 1,6 : 1 bei den schwersten ansteigt.

Die Verhältnisse werden dadurch noch etwas komplizierter, daß für die Energie des Kerns nicht nur das Verhältnis der Neutronenzahl zur Protonenzahl maßgebend ist, sondern es außerdem eine wesentliche Rolle spielt, ob die Massenzahl des Kerns gerade oder ungerade ist, und im ersteren Fall wieder, ob die gerade Massenzahl durch eine gerade Protonenzahl und eine gerade Neutronenzahl oder durch eine ungerade Protonenzahl und eine ungerade Neutronenzahl zustande kommt. Dadurch wird es möglich, daß es zur selben Gesamtnukleonenzahl verschiedene stabile Kerne (*Isobare) mit verschiedener Zusammensetzung gibt.

Weicht das Zusammensetzungsverhältnis zu sehr von demjenigen tiefster Energie ab, so ist der betreffende Kern auf jeden Fall instabil und zerfällt radioaktiv, und zwar ist es so, daß ein Kern, der relativ zuviel

Neutronen enthält, einen β-Zerfall erleidet, wodurch sich eines seiner Neutronen in ein Proton verwandelt, und umgekehrt ein Kern mit relativ zuwenig Neutronen einen Positronenzerfall oder einen K-Einfang erleidet, wodurch eines seiner Protonen in ein Neutron übergeht. Erst sehr schwere Kerne können energetisch instabil gegen Aussendung eines α-Teilchens werden.

Der am einfachsten aufgebaute zusammengesetzte Kern ist das Deuteron, das nur aus e i n e m Proton und e i n e m Neutron besteht. Es spielt in der Theorie des K.s daher eine ähnliche Rolle wie das Wasserstoffatom in der Theorie des Atombaus und ist weitgehend berechenbar. Bei den schwereren Kernen sind die genaueren Verhältnisse, wenn man über das Tröpfchenmodell hinausgeht, recht kompliziert. Man kann auf Grund des Einkörpermodells Näherungen durchführen und gelangt bei Annahme einer festen Spin-Bahn-Kopplung der Nukleonen im K. zum *Schalenmodell der Atomkerne in Analogie zu den Elektronenschalen im Atombau. [1]

engl.: nuclear structure franz.: constitution du noyau

Lit.: s. Kern. Ferner C. F. v. Weizsäcker, Die Atomkerne, Ak. Verl. Ges., Leipzig, 1937. – H. Dänzer, Theoret. Kernphysik, Braun, Karlsruhe, 1948. – W. Heisenberg, Theorie des Atomkerns, MPI f. Physik, Göttingen, 1951. – J. M. Blatt u. V. F. Weisskopf, Theoretical Nuclear Physics, Wiley, New York, 1952.

Kernbausteine. Unter K.n versteht man diejenigen Elementarteilchen, aus denen der Atomkern zusammengesetzt ist. K. sind Protonen und Neutronen; sie werden als zwei Quantenzustände des Elementarteilchens „Nukleon" aufgefaßt. Sie sind im Atomkern in ungefähr gleicher Zahl vorhanden. Bei schweren Kernen überwiegt die Zahl der Neutronen. Die Anzahl der K. bezeichnet man als Massenzahl dieses Kerns. Sie wird als ein oberer Index dem chemischen Symbol für das zugehörige Atom vorangesetzt (mitunter auch angehängt), z. B.: ^{4}H, ^{208}Pb, ^{238}U (oder He^{4}, Pb^{208}, U^{238}). Die Zahl der K. eines chemischen Elements ist nicht exakt festgelegt: z. B. gibt es mehrere Sorten Blei: ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb. Diese Erscheinung bezeichnet man als Isotopie (s. Isotope). [7]

engl.: nuclear particles
franz.: éléments constitutifs du noyau

Kernbewegung. Im Bohrschen Atommodell bewegen sich nicht nur die Elektronen der Atomhülle, sondern – wenn auch viel weniger – auch der Kern, da ja der Schwerpunkt des ganzen Systems in Ruhe bleiben muß. Durch die K. fallen die Energieniveaus des Atoms ein klein wenig anders aus, als dies bei festgehaltenem Kern der Fall wäre; beim Wasserstoffatom z. B. werden alle Terme und damit auch alle Linienfrequenzen um 0,054 % kleiner. [1]
engl.: motion of nucleus
franz.: mouvement du noyau

Kernbindung, s. Kernenergie, Kernkraft, Kernfeld.

Kernbrennstoff, s. Brennstoff.

Kernchemie. Die Wissenschaft von den chemischen Aspekten der natürlichen und künstlichen Umwandlung der Atomkerne. [18]
engl.: nuclear chemistry
franz.: chimie nucléaire

Kerndichte. Da der Kern nur eine Ausdehnung von ca. 10^{-12} cm besitzt (s. Kernradius) und somit in einem winzigen Volumen fast die gesamte Masse des Atoms vereinigt, hat die Materie in diesem sehr kleinen Kernvolumen eine ungeheuer große Dichte, die sich zu etwa $1{,}4 \cdot 10^{14}$ g/cm³ errechnet. Ein Stecknadelkopf, der kompakt aus einer derartig dichten Materie bestünde, würde 100 000 t wiegen. [1]
engl.: nuclear density
franz.: densité du noyau

Kerneinfang heißt die Absorption von Teilchen durch den Atomkern unter nachfolgender Emission eines γ-Quants. Zum Beispiel können die durch eine Materiemenge diffundierenden Neutronen dadurch verschwinden, daß sie an einen Kern angelagert werden. Als Verlustquelle wird man dann K. angeben.
K. kann auch den Elektronen der K-Schale passieren (unter Überführung des Elements mit der Ladung Z in ein solches mit der Ladung $Z-1$). Diesen Prozeß bezeichnet man im allgemeinen als *K-Einfang. [7]
engl.: nuclear capture
franz.: capture par noyaux

Kernemulsion, s. Photoschichtspuren.
engl.: nuclear emulsion *franz.: émulsion nucléaire*

Kernenergie. Die Energien, welche im Kern der Atome eine Rolle spielen, sind außerordentlich viel höher als diejenigen in der Elektronenhülle (s. Atombau). Man kann dies ganz grob so einsehen: Infolge der 10^4- bis 10^5mal kleineren Abstände sind schon die Coulombschen Abstoßungskräfte etwa zwischen zwei Protonen im Kern 10^8- bis 10^{10}mal größer als die Coulombsche Anziehung zwischen Kern und Elektron im Wasserstoffatom; die anziehenden *Kernkräfte, welche ja die Coulombsche Abstoßung überwinden, sind noch wesentlich stärker. Nun steigt zwar die Energie nicht im selben Verhältnis wie die Kraft (da mit den kleineren Dimensionen ja auch die Verschiebungen kleiner werden), aber man erhält auch für die Energie noch einen Vergrößerungsfaktor 10^5 bis 10^6. Wenn also die Energie, die bei Änderungen in den äußersten Teilen der Elektronenhülle umgesetzt wird (z. B. bei chemischen Vorgängen, Anregung oder Ionisation), je Atom einige eV beträgt, so ist die Energie, welche bei Änderungen der Kerne umgesetzt wird (z. B. bei Anlagerung eines Nukleons), $\varepsilon = 6$ bis 8 MeV.

Die totale *Bindungsenergie der Kerne, d. h. die Energie, die man aufwenden müßte, um einen Kern in all seine Nukleonen zu zerlegen, ist $A \cdot \varepsilon$. Sie erreicht bei den schwersten Kernen 1800 MeV.

Bei dem Begriff „K." denkt man meist an die technische Nutzbarmachung dieser riesigen Energien. Sie gelingt bis jetzt nur mittels eines einzigen Vorgangs: der *Kernspaltung mit anschließender *Kettenreaktion.

Eine noch größere Anschaulichkeit als die auf das einzelne Atom bezogenen Werte der K. in eV vermitteln die auf 1 kg umgerechneten Energieziffern in Kalorien. Während bei der Verbrennung von 1 kg Kohle rund 8000 Kalorien entstehen, setzt 1 kg Radium bei seiner vollständigen Umwandlung bis zum inaktiven Blei – ein Prozeß, der jedoch, bis er zur Hälfte abgelaufen ist, 1600 Jahre braucht – über 3 Milliarden Kalorien frei und bei der völligen Spaltung der Kerne von 1 kg

des Uranisotops U 235 durch eine Kernkettenreaktion werden sogar rund 20 Milliarden Kalorien verfügbar. 1 Gramm dieses Materials ist energetisch äquivalent etwa $2^1/_2$ t Kohle.

Noch höher (etwa 160 Milliarden Kalorien je kg) liegt die Energie, welche beim Zusammentreten von vier Protonen zu einem Heliumkern frei wird, ein Prozeß, der für die Energielieferung der Sonne und anderer Fixsterne maßgebend ist und der in einer gewissen Abwandlung auch bei der Wasserstoffbombe eine Rolle spielt. Auch diese „thermonukleare Reaktion" könnte für die technische Verwertung der K. nutzbar gemacht werden, sobald es gelingt, die außerordentlichen Schwierigkeiten, die dieser Prozeß bietet, vollends zu überwinden. [1]

engl.: nuclear energy
franz.: énergie nucléaire

Lit.: s. Kern. Ferner: F. Dessauer, Atomenergie und Atombombe, Knecht, Frankfurt a. M., 1948. – Zeitschrift „Atomkern-Energie", Thiemig, München, 1956 ff.

Kernexplosion, s. Kernverdampfung.

Kernfeld. Die Wechselwirkung von Kernbausteinen untereinander erfolgt durch Kernkräfte. Diese sind ebenso wie die elektromagnetischen und die Gravitationskräfte Nahewirkungen, werden also durch ein „Feld", das K., vermittelt. Ähnlich wie in der Maxwellschen Theorie das elektromagnetische Feld durch Feldgleichungen beschrieben wird, geschieht dies hier durch die Yukawasche oder *Mesonentheorie. Der Unterschied in den Feldgleichungen besteht darin, daß hier zu einzelnen der Maxwellschen Gleichungen lineare, das Potential enthaltende Glieder hinzugefügt werden. Diese Glieder bewirken, daß die Wellengleichungen die folgende Form bekommen:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2}\,\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}-\varkappa^2\,\Phi=0\,.$$

(Φ ist irgendeine Feldgröße, z. B. das Potential.)
Das Glied $\varkappa^2\,\Phi$ bedeutet, daß die Lösung dieser Differentialgleichung für ein kugelsymmetrisches Potential im stationären Fall ($\partial\Phi/\partial t = 0$) nicht wie in der Elektrodynamik $1/r$, sondern $e^{-\varkappa r}/r$ ist. Dieses Poten-

tial trägt dem steilen Abfall der Kernkräfte in der unmittelbaren Umgebung des Quellpunkts Rechnung. Nach der Erfahrung ist $\varkappa^{-1} \approx 2 \cdot 10^{-13}$ cm einzusetzen. S. a. Kernkraft. [7]
engl.: nuclear field, meson field
franz.: champ nucléaire

Kerninduktion, eine von Bloch 1946 erdachte Methode, das magnetische Moment von Atomkernen (s. Kernmoment, magnetisches) ohne Anwendung eines Atomstrahls in einem kompakten Stück fester oder flüssiger Materie zu messen. Das Probestück, z. B. ein kleines Gefäß mit Wasser, wenn man das Moment des Protons messen will, wird in ein starkes, konstantes Magnetfeld gebracht. In diesem benehmen sich die Atomkerne wie kleine Kreisel, d. h. sie führen unter dem Drehmoment, welches das Magnetfeld auf sie ausübt, eine Präzessionsbewegung, die sog. Larmor-Präzession mit einer Frequenz von einigen MHz (s. Larmor-Frequenz) aus. Diese Präzession kann nun durch ein zum ersten Feld senkrechtes magnetisches Hochfrequenzfeld kohärent aufgeschaukelt werden, falls dieses mit der Larmor-Frequenz der Präzession in Resonanz ist. Das Eintreten der Resonanz wird daran erkannt, daß dann ein neues, zu beiden angewandten Feldern senkrechtes hochfrequentes Magnetfeld auftritt, das in einer herumgelegten Spule eine Spannung induziert (daher der Name K.). Aus der so ermittelten Larmor-Frequenz errechnet man leicht das magnetische Moment der Kerne, das nach dieser Methode mit einer Genauigkeit bis 1/100 % bestimmt werden kann.
Eine verwandte Methode, die unabhängig etwa zu gleicher Zeit entstand, beruht darauf, das Eintreten der Resonanz durch die Absorption elektromagnetischer Wellen durch die präzedierenden Kerne festzustellen. S. a. Resonanzabsorption. [1]
engl.: nuclear induction
franz.: induction nucléaire

Lit.: H. Kopfermann, Kernmomente, 2. Aufl., Ak. Verl. Ges., Frankfurt a. M., 1956.

Kernisomerie, die Erscheinung, daß es Kerne gibt (isomere Kerne), welche dieselbe Zahl sowohl von

Protonen als von Neutronen enthalten und doch verschiedene Eigenschaften haben, was offensichtlich auf einer verschiedenen Anordnung der Bausteine beruhen muß. Es gibt jedoch von keiner Kernart mehr als zwei Isomere, und von diesen ist immer entweder eines oder alle beide radioaktiv. Im ersten Fall geht der instabile isomere Kern unter Aussendung seines Energieüberschusses als γ-Quant in den stabilen über, wie z. B. beim Indiumisotop $^{115}_{49}In$. Im zweiten Fall sind meist beide Isomere β-radioaktiv, unterscheiden sich dann aber, oft sehr beträchtlich, in ihrer Halbwertszeit. [1]

engl.: nuclear isomerism
franz.: isomérie nucléaire

Kernkorrosion. Die allmähliche Zerstörung eines Materials, das mit intensiven Kernprozessen in Berührung kommt, z. B. im Reaktor, durch die Kerntreffer der das Material durchsetzenden Neutronen und anderen Kerntrümmer. [1]

engl.: nuclear corrosion
franz.: corrosion par rayonnement

Kernkraft ist jenes Phänomen, das den Zusammenhalt der aus Protonen und Neutronen aufgebauten Atomkerne bewirkt. Keine der gewöhnlichen Kräfte wie die Gravitation oder die Coulomb-Kraft können für den Zusammenhalt der Nukleonen verantwortlich sein. Dafür nur zwei einfache Argumente: Die Gravitation ist um viele Größenordnungen zu klein: die elektrischen Kräfte würden, da wir ja nur positiv geladene Elementarteilchen im Kern haben, zu einer Abstoßung führen. Die K.e treten also neben die elektrischen Kräfte, die für den Aufbau der Atome und Moleküle charakteristisch sind, und die Gravitation, die das Verhalten großer Massen bestimmt, als eine prinzipiell gleichberechtigte, uns neu bekannt gewordene Kraft. Ihre Größe und Bedeutung auch für technische Anwendungen ist uns durch Atombomben und Atomkraftwerke nahegebracht.

Die K.e wirken zwischen Protonen untereinander, Neutronen untereinander und Proton-Neutron-Systemen in jeweils gleicher Stärke. Die K.e sind also (wenigstens in sehr guter Näherung) von der Ladung der Kern-

bausteine unabhängig. Über die Stärke der in jedem einzelnen Atom wirkenden K.e gibt der Massendefekt Auskunft. Er zeigt, daß die durch die K.e bewirkte *Bindungsenergie vom Deuteron (zwei Nukleonen) bis zum Alphateilchen (vier Nukleonen) um eine Größenordnung zunimmt; bei den schweren Kernen erfolgt die Zunahme nur noch proportional zu der Zahl der im Kern vorhandenen Nukleonen. Dieses bei schweren Kernen auftretende Phänomen ist spezifisch für die K.e; weder bei der Gravitation noch bei den elektrischen Kräften ist etwas Derartiges beobachtet. In beiden Fällen nämlich übt jedes Teilchen auf jedes andere Kraftwirkungen aus; daher sollte der Energieinhalt verschieden großer Systeme proportional A^2 sein, wenn A die Zahl der Bestandteile dieser Systeme ist. Das abweichende Verhalten der K.e bezeichnet man als Absättigung. Es bedeutet, daß in schweren Kernen ($A > 4$) nicht jedes Teilchen mit jedem anderen in Wechselwirkung tritt.

Dieses absonderliche Verhalten wird erklärt durch die Spinabhängigkeit der K.e. Man drückt damit aus, daß die Kraftwirkung, die zwei Nukleonen aufeinander ausüben, nicht unabhängig davon ist, ob die beiden Teilchen parallelen oder antiparallelen Spin (gleichen oder entgegengesetzten Drehsinn) haben. (Andere Möglichkeiten gibt es nach der Quantentheorie nicht.) Einen sehr groben Vergleich aus der makroskopischen Physik stellen zwei Elektromagnete dar, deren Wirkung aufeinander davon abhängig ist, ob die Ströme in jeweils gleichen oder in entgegengesetzten Richtungen fließen. Quantitativ reicht die Spinabhängigkeit zur Erklärung der Absättigung nicht aus. Sie würde eine Absättigung zu Paaren bedeuten, während man aus der Bindungsenergie von Deuteron (2,2 MeV) und α-Teilchen (28 MeV) auf eine Absättigung zu Vieren schließen muß.

Die Reichweite der K.e ist sehr gering. Das mag die entscheidende Ursache dafür sein, daß ihre Existenz erst in unserem Jahrhundert nachgewiesen werden konnte. Die K.e sind auf die Dimensionen des Atomkerns beschränkt (Durchmesser ca. 10^{-12} cm). Außerhalb des Atoms (Durchmesser ca. 10^{-8} cm) ist

nichts mehr von den K.n zu spüren. Als Sonde zur Feststellung des Kraftverlaufs kann man daher nur Elementarteilchen benutzen, die die Atomhülle durchdringen und in die unmittelbare Nähe des Atomkerns kommen. Tatsächlich ist die Wirkung der K.e erstmals bei Streuexperimenten festgestellt worden, bei denen das Geschoß genügend Energie besaß, um gegen das Coulomb-Feld des Kerns anlaufen zu können. Es zeigte sich dann eine Abweichung von jener Streuverteilung, die man als Wirkung des reinen Coulomb-Potentials kannte. Auf Grund solcher Erfahrungen hat man den Radialverlauf des Kernpotentials näherungsweise festgelegt. Er ist auf Grund der Phänomenologie zweckmäßigerweise darzustellen durch Exponentialfunktionen wie $e^{-\varkappa r}$ oder $e^{-(r/a)^2}$. Die Mesonentheorie der Kernkräfte liefert das etwas schwieriger zu handhabende Potentiale $e^{-\varkappa r}/r$. $\varkappa^{-1}$ bzw. a sind das übliche Maß für die Reichweite der K.e. Beide haben auf Grund der Erfahrung ungefähr den Wert $2 \cdot 10^{-13}$ cm. Bisher ist in den Potentialen noch nicht die Spinabhängigkeit der K.e, die deren Absättigung bewirkt, ausgedrückt. Die Spinabhängigkeit tritt als ein Faktor zu dem radialen Teil des Potentials hinzu und läuft bei elementarem Ansatz auf einen Austausch der Spineigenschaften zwischen zwei Kernbausteinen hinaus. Die möglichen Ansätze sind bei dem Stichwort Austauschkraft angegeben. Sie heißen Bartlett-Kraft, Majorana-Kraft, Heisenberg-Kraft. Die mathematischen Formulierungen dieser phänomenologischen Ansätze entsprechen nicht den Invarianzforderungen, die man an die Theorie stellen muß. Sie haben daher in der heutigen rechnenden Kernphysik keine nennenswerte Bedeutung mehr. An deren Stelle ist als entscheidender Ausdruck, der die für die Bindung von Nukleonen charakteristischen Eigenschaften wiedergibt, das Tensorpotential getreten, in dem die Spinrichtung der beiden Nukleonen und die Richtung der Verbindungslinie der beiden Schwerpunkte gekoppelt sind; außerdem sind komplizierte nichtstatische Potentiale wirksam. Ansätze zu einer vom Standpunkt des theoretischen Physikers befriedigenden Beschreibung der K.e sind in der Mesonentheorie

der K.e enthalten. Doch sind die Schwierigkeiten einer solchen Theorie noch recht groß. [7]

engl.: nuclear force

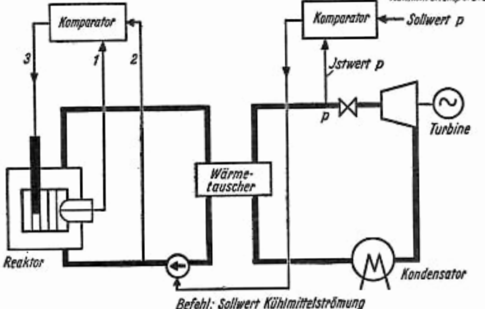
franz.: force nucléaire

Lit.: H. A. Bethe u. H. Morrison, Elementary Nuclear Theory, 2. ed., John Wiley & Sons, New York, 1957. – L. Rosenfeld, Nuclear Forces, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1948. – G. Gamow u. C. L. Critchfield, The Theory of Atomic Nucleus and Nuclear-Energy-Sources, Clarendon Press, Oxford, 1949. – J. Blatt u. V. Weißkopf, Wiley & Sons, New York, 1952.

Kernkraftwerksregelung hat die Aufgabe, das Arbeiten der verschiedenen Anlageteile aufeinander abzustimmen und die Leistung des Werkes entsprechend den Erfordernissen des elektrischen Netzes zu regeln. Grundsätzlich kann man heute drei Arten des Verhaltens von Kraftwerken auf Vorgänge im elektrischen Netz unterscheiden:

1. Schnelle Reaktion der Anlage auf Netzvorgänge. In diese Gruppe fallen alle frequenzhaltenden Werke. Sie sichern die Konstanz der Netzfrequenz. Sie benötigen ein integrales Regelsystem, das als primäre Regelgröße die Frequenz des Netzes hat.

2. Anlagen, die Schwankungen der Netzfrequenz entgegenwirken (frequenzstützende Werke), aber nicht auf den exakten Sollwert der Frequenz regeln. Ihnen genügt ein proportionales Regelsystem mit definiertem Proportionalbereich und der Netzfrequenz als Eingangsgröße.



3. Anlagen, die auf Netzvorgänge nicht bzw. sehr träge reagieren. Sie nehmen an der Frequenzhaltung nicht bzw. nur im äußersten Notfall teil. Ihr Betrieb vereinfacht sich dadurch gegenüber 1. und 2., so daß man neuartige Anlagen bevorzugt in dieser Weise baut. Die Leistung der Anlage wird entsprechend der geforderten Last festgelegt. Hier benützt das Regelsystem die Frequenz nicht als die das Lastniveau bestimmende Regelgröße, sondern es hat die Leistung der Anlage entsprechend dem festgesetzten Sollwert zu regeln.

Es bestehen folgende Möglichkeiten, die Leistungsregelung durchzuführen:

a) Reaktorleistung wird nach dem Sollwert der Last geregelt. Die Ventile vor der Turbine werden nach dem Druck p vor der Turbine gesteuert.

Da hier die im System Reaktor + Wärmeaustauscher gespeicherte Energie einer Lasterhöhung nicht bzw. nur verzögert zur Verfügung steht, bieten die folgenden Lösungen meistens mehr Vorteile.

b) Reaktorleistung wird nach dem Druck p geregelt. Die Ventile vor der Turbine werden nach dem Sollwert der Last gesteuert.

Eine Regelung des Reaktors nach konstantem p hat bei festem Kühlmittelfluß eine Änderung der mittleren Kühlmitteltemperatur zur Folge. Dies bedeutet Reaktivitätsänderungen wegen des Temperaturkoeffizienten und damit u. a. verhältnismäßig große Bewegungen der Regelstäbe. Kühlmitteltemperaturänderungen können für konstantes p durch einen regelbaren Kühlmittelfluß vermieden werden. Ein derartiges Regelschema ist in der Abb. vereinfacht dargestellt.

c) Die Reaktorleistung wird auf konstante mittlere Kühlmitteltemperatur T_m geregelt. Die Ventile vor der Turbine werden nach dem Sollwert der Last gesteuert.

Für eine Anlage mit negativem Temperaturkoeffizienten der Reaktivität folgt der Reaktor einer Lastforderung, ohne daß zunächst Regelmechanismen betätigt werden müssen. Die mittlere Kühlmitteltemperatur stabilisiert sich selbst, wenn man vom Vergiftungseffekt bei Laständerungen absieht, der durch eine kleine Bewegung der Regelstäbe kompensiert werden

muß. Bei einem konstanten Kühlmittelfluß hat T_m = const. einen mit der Last variablen Druck p vor der Turbine zur Folge, der für diese unerwünscht ist. Durch regelbaren Kühlmittelfluß läßt sich diese Schwierigkeit beheben.

Bei einem konkreten Regelsystem für eine Anlage kann eine Mischung der hier genannten Regelprinzipien verwendet werden. Bei der Beurteilung eines Regelsystems leistet die sein dynamisches Verhalten beschreibende Übergangsfunktion wertvolle Dienste. [21]

Kernladungszahl, die Anzahl der Elementarladungen, mit denen ein Kern positiv geladen ist. Die K. ist gleich der Ordnungszahl des chemischen Elementes und im neutralen Atom gleich der Zahl der Hüllenelektronen. [1]
engl.: atomic number
franz.: nombre de charge nucléaire

Kernmagneton (KM). Entsprechend zum B o h r - schen Magneton definiert man das K. mit der Protonenmasse M statt der Elektronenmasse als

$$1\,KM = \frac{e\,h}{4\,\pi\,M\,c} = 0{,}505 \cdot 10^{-23}\,\text{Gauß cm}^3\,.$$

Dabei ist e die Elementarladung, h das P l a n c k - sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit. Die magnetischen Momente der Kerne liegen in der Größenordnung des K.s, sind aber nicht etwa ganze Vielfache von ihm. [1]
engl.: nuclear magneton
franz.: magnéton nucléaire

Kernmasse, die Ruhmasse eines Atomkerns (s. Kern). Man erhält sie aus der Atommasse durch Subtraktion der Masse der Elektronen der Hülle und gibt sie meist in Masseneinheiten (*ME) an. Zum Beispiel ist die Masse des (normalen) Heliumatoms 4,00388. Davon geht ab für zwei Elektronen 0,00110, verbleibt also für den Heliumkern $^{2}_{4}\text{He}$ (α-Teilchen) 4,00278 Masseneinheiten. Für die Massenbilanz der *Kernreaktionsformeln, für welche natürlich die Kernmasse maßgebend ist, wird trotzdem meist die Atommasse

eingesetzt. Das schadet nichts, da stets auf beiden Seiten der Gleichung gleich viel Elektronen abgezogen werden müssen. [1]
engl.: nuclear mass
franz.: masse du noyau, masse nucléaire

Kernmasseneinheit, s. ME.

Kernmaterie. Eine Materie sehr hoher Dichte, welche aus einem auf engsten Raum zusammengepreßten Gemisch von Kernen und Elektronen besteht, in dem sich keine Atome bilden können. Sie wird in gewissen Fixsternen, den „weißen Zwergen" angenommen, die extrem hohe Dichten von der Größenordnung 10^5 haben. [1]
engl.: nuclear matter

Kernmodell, eine vereinfachte Darstellung des an sich sehr komplexen Kernbaus. Dabei ist das mathematisch-physikalische Schema so zu entwickeln, daß möglichst viele Kerneigenschaften wiedergegeben werden. Für bestimmte Gruppen von Eigenschaften gibt es verschiedene Modelle. Die wichtigsten sind das *Tröpfchenmodell, das *Schalenmodell und das statistische Modell. [7]
engl.: nuclear model
franz.: modèle de noyau

Kernmoment, magnetisches. Ähnlich wie viele Atome (s. Atommoment, magnetisches) haben auch die meisten Kerne ein magnetisches Moment, das K. Während aber das magnetische Moment der Atome nach Bohrschen *Magnetonen rechnet, ist dasjenige der Kerne nur von der Größenordnung des rund 2000mal kleineren *Kernmagnetons. Es ist jedoch nicht ein ganzzahliges Vielfaches von diesem und setzt sich auch bei zusammengesetzten Kernen nicht additiv aus den magnetischen Momenten der Bestandteile zusammen.
Das K. läßt sich aus der Hyperfeinstruktur der Spektren und insbesondere aus deren Zeeman-Effekt bestimmen, neuerdings auch mit sehr großer Genauigkeit mittels der Atomstrahl-Resonanzmethode, der Kerninduktion und verwandten Verfahren.
Die vorstehende Zusammenstellung gibt das K., zusammen mit dem Kernspin, für einige Kerne an. Nega-

tives K. bedeutet, daß der Vektor des K.s die umgekehrte Richtung hat wie der des Spins. [1]

Kern		Spin (in Vielfachen von $h/2\pi$)	Magnetisches Moment (in Kernmagnetonen)
${}^{1}_{0}n$	Neutron	1/2	−1,9130
${}^{1}_{1}H$	Proton	1/2	2,7927
${}^{2}_{1}H$	Deuteron	1	0,8574
${}^{4}_{2}He$	α-Teilchen	0	0
${}^{6}_{3}Li$		1	0,8219
${}^{7}_{3}Li$		3/2	3,2560
${}^{9}_{4}Be$		3/2	−1,1773
${}^{39}_{19}K$		3/2	0,3909
${}^{40}_{19}K$		4	−1,2964

engl.: nuclear moment
franz.: moment magnétique du noyau
Lit.: s. Kern. Ferner: H. Kopfermann, Kernmomente, 2. Aufl., Ak. Verl. Ges., Frankfurt/M., 1956.

Kernmühle. Ein von Wideröe vorgeschlagenes System eines Teilchenbeschleunigers für sehr hohe Energien, in dem positive und negative, oder auch positive und positive Elementarteilchen in entgegengesetzter Richtung in einer Kreisbahn im Magnetfeld gegeneinander „geschossen" werden. [24]

Kernphotoeffekt. Unter K. versteht man eine Kernumwandlung, bei welcher ein energiereiches Photon aus einem Kern ein Neutron herauswirft, ähnlich wie beim gewöhnlichen Photoeffekt ein Elektron durch ein Photon herausgeworfen wird. Der K. ist eine ziemlich häufige Art der Kernumwandlung; rund 70 verschiedene Fälle sind bekannt. [1]
engl.: nuclear photo effect
franz.: photodésintégration nucléaire

Kernphysik ist derjenige Zweig der Physik, der sich mit der Untersuchung der Eigenschaften und der Beschreibung des Atomkerns befaßt. [7]
engl.: nuclear physics *franz.: physique nucléaire*

Kernpotential ist das Potential der *Kernkräfte. [7]
engl.: nuclear potential
franz.: potentiel nucléaire

Kernprozeß, s. Kernumwandlung.
engl.: nuclear reaction
franz.: transmutation, désintégration, processus nucléaire

Kernpyknose, als Erscheinungsbild für pathologisch veränderte und meist nicht mehr teilungsfähige Zellkerne (s. Mitose), in denen die Chromosomen verklebt bzw. verschmolzen sind. Sie kommen normal in absterbenden Geweben oder einzelnen Zellen vor, können aber auch durch Außeneinflüsse (schlechte Ernährung, Chemikalieneinwirkung, Röntgen-Bestrahlung) hervorgerufen werden. K. können den Tod der betreffenden Zellen herbeiführen. [28]
engl.: pyknosis
franz.: pyknose

Kernradius. Einen ungefähren K. kann man aus der Streuung von α-Teilchen und anderen Partikelchen an einem Kern experimentell gewinnen als den Abstand vom Kernmittelpunkt, in dem das Coulombsche Abstoßungsgesetz merklich zu versagen beginnt. Neuerdings konnten für manche Kerne sehr genaue K.n aus den Daten der Mesonenatome ermittelt werden. Der K. aller Kerne liegt ungefähr in der Größenordnung 10^{-12} cm und wächst mit der Massenzahl A (d. h. dem Atomgewicht) der Kerne an. Der Gang mit A läßt sich etwa ausdrücken durch die Formel:

$$r = r_0 \sqrt[3]{A},$$

wo r_0 etwa gleich dem „klassischen Elektronenradius", $1{,}42 \cdot 10^{-13}$ cm ist. Diese Abhängigkeit von A würde eine konstante Dichte aller Kerne (s. Kerndichte) bedeuten. Aus den Mesonenatomen ergibt sich r_0 etwas kleiner, nämlich zu $1{,}20 \cdot 10^{-13}$ cm. Der Unterschied liegt daran, daß in beiden Fällen etwas anderes als „Radius" wirksam wird. [1]
engl.: nuclear radius *franz.: rayon du noyau*

Kernreaktion, s. Kernumwandlung.
engl.: nuclear reaction
franz.: réaction nucléaire

Kernreaktions-Formeln

Kernreaktions-Formeln. Die K. geben mittels der für die einzelnen Kerne gültigen Symbole den Verlauf einer *Kernumwandlung an, ähnlich wie chemische Reaktionsgleichungen den Verlauf einer chemischen Reaktion beschreiben. So bedeutet z. B.

$$^{23}_{11}\mathrm{Na} + ^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{24}_{11}\mathrm{Na}^* + ^{1}_{1}\mathrm{H} + 4{,}8\ \mathrm{MeV}\,,$$

daß auf einen normalen Natriumkern $^{23}_{11}\mathrm{Na}$ ein Deuteron $^{2}_{1}\mathrm{H}$ auftrifft, und daß dabei ein radioaktiver (angedeutet durch den Stern) Natriumkern $^{24}_{11}\mathrm{Na}$ entsteht und ein Proton $^{1}_{1}\mathrm{H}$ wegfliegt, wobei außerdem je umgewandelten Kern eine Energie von 4,8 MeV frei wird. Die letztere Angabe bleibt vielfach in der K. auch weg. Das radioaktive Natrium zerfällt unter Aussendung von β-Strahlen weiter nach der K.:

$$^{24}_{11}\mathrm{Na}^* \xrightarrow[14{,}8^{\mathrm{h}}]{} ^{24}_{12}\mathrm{Mg} + e^- + 1{,}4\ \mathrm{MeV}\,.$$

Der Vorgang der zuerst angegebenen K. wird heute meist in der abgekürzten Form

$$^{23}\mathrm{Na}\ (\mathrm{d, p})\ ^{24}\mathrm{Na}^*$$

geschrieben. Dabei bedeutet stets das erste Zeichen in der Klammer das eingeschossene, das zweite das herausfliegende Teilchen. Für Neutron, Proton, Deuteron, α-Teilchen und Photon werden dabei die Symbole n, p, d, α und γ gebraucht. [1]

engl.: nuclear reaction formulae

franz.: formules de réactions nucléaires

Kernreaktions-Typen (auch Umwandlungstypen). Die große Zahl der Kernumwandlungen läßt sich in einzelne Typen ordnen, die K.-T. So lassen sich z. B. alle Umwandlungen der Art $^{14}\mathrm{N}\ (\alpha, \mathrm{p})\ ^{17}\mathrm{O}$ (s. Kernreaktionsformeln), bei denen ein α-Teilchen eingeschlossen wird und ein Proton herausfliegt, in den K.-T. (α, p) zusammenfassen. Von diesem Typ sind heute ca. 40 Fälle bekannt.

Die wichtigsten K.-T. sind (mit Angabe der heute bekannten Zahl der zu diesen K.-T. gehörigen Fälle):

1. Umwandlungen durch α-Teilchen:
   (α, p) ca. 40, (α, n) über 100.
2. Umwandlungen durch Deuteronen:
   (d, α) ca. 60, (d, p) ca. 160, (d, n) ca. 120.

3. Umwandlungen durch Protonen:
   (p, α) 13, (p, n) ca. 140, (p, γ) ca. 40.
4. Umwandlungen durch Neutronen:
   (n, α) ca. 60, (n, p) ca. 90, (n, γ) über 200.
5. Umwandlungen durch Photonen:
   (γ, p) ca. 20, (γ, n) ca. 70.

Daneben gibt es noch eine große Anzahl seltener K.-T. Neben den oben angegebenen K.-T., bei denen jeweils nur ein Teilchen herausfliegt, gibt es auch solche, bei welchen in einer Umwandlung mehrere Teilchen herausgeworfen werden, angefangen von zwei. Zum Beispiel ist der K.-Typ (n, 2n) in über 100 Fällen bekannt. Treten mehr Teilchen aus, spricht man von einer Kernexplosion.
Ein auffallender K.-Typ ist die *Kernspaltung, bei welcher durch Auftreffen eines Teilchens, meist eines Neutrons, ein Kern in zwei große Bruchstücke und mehrere Neutronen zerfällt. [1]
engl.: types of nuclear reactions
franz.: types des réactions nucléaires

Kernreaktor, s. Reaktor.

Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft mbH. Karlsruhe widmet sich mit der gegenwärtigen Planung und Erstellung des ersten deutschen Reaktoreigenbaus der – wie es im Gesellschaftsvertrag formuliert ist – der „Gewinnung, Sammlung und Auswertung wissenschaftlicher und technischer Erkenntnisse und Erfahrungen beim Bau und Betrieb einer Reaktorstation für die friedliche Entwicklung und Nutzbarmachung der Kernenergie im Interesse der Allgemeinheit“ dienen soll. Ihre zweite Hauptaufgabe liegt in der „Förderung der praktischen Ausbildung wissenschaftlichen und technischen Nachwuchses“. An der am 19. Juli 1956 in Karlsruhe gegründeten Gesellschaft sind die Bundesrepublik Deutschland mit 30 %, das Land Baden-Württemberg mit 20 % und die Kernreaktor-Finanzierungs-Gesellschaft mbH. als Repräsentantin der Industrie mit 50 % des Stammkapitals (z. Z. 40 Mill. DM) beteiligt. Der z. Z. in Bau befindliche Reaktor *FR 2, der mit einer Wärmeleistung von 12 Megawatt bei Verwendung natürlichen

Urans in Form von metallischen Stäben als Brennstoff und von Schwerem Wasser als Moderator und Kühlmittel nur Strahlung, nicht technisch verwertbare Energie erzeugen soll, ist also zusammen mit den im Bau befindlichen Forschungsinstituten (Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik: Prof. Dr. Wirtz, Institut für Strahlenbiologie und Strahlenschutz: Prof. Dr. Zimmer, Institut für Radiochemie: Prof. Dr. Seelmann-Eggebert, Laboratorium für Isotopenverteilung: Dr. Hogrebe) ein Gemeinschaftswerk der öffentlichen Hand und der deutschen Industrie. In enger Verbindung mit diesem auf Gemarkung Leopoldshafen, nördlich Karlsruhe, entstehenden Atomforschungszentrum wird als Institut der TH Karlsruhe ein Institut für Isotopentrennung (Prof. Dr. Becker) und das von der Isotopenstudiengesellschaft finanzierte Institut für Isotopenanwendung in der Technik (Prof. Dr. Berthold) stehen. Ihrer Aus- und Fortbildungsaufgabe entsprechend unterhält die Gesellschaft Kurse verschiedener Art, Dauer und Zielsetzung. Anschrift der Gesellschaft: Karlsruhe, Weberstr. 5.

Kernreinheit, 1. prozentualer Anteil der gewünschten Kerne eines Elementes in einer Substanz.
2. Reinheitsbegriff für Kernbrennstoffe.
In beiden Fällen wird die K. angegeben durch den prozentualen Anteil des makroskopischen Absorptionsquerschnittes, oder durch eine obere Grenze für den effektiven Absorptionsquerschnitt gegenüber Neutronen.
Der Gehalt an den ausgesprochenen Neutronengiften (B, Cd, Hf, Co, seltene Erden) sollte bei nuklearreinen Stoffen einen Wert von 0,1 bis 1 ppm nicht überschreiten. Die Ansprüche an die Freiheit von anderen Verunreinigungen sind in dem Maß geringer, wie der Absorptionsquerschnitt gegenüber thermischen Neutronen abnimmt. Die Reinheit nuklearreiner Stoffe gibt man häufig in *Boräquivalenten an. [3, 20]
engl.: nuclear purity
franz.: pureté nucléaire

Kernspaltung, die Zerlegung eines Kerns in zwei Teile derselben Größenordnung – neben eventuell einigen kleineren „Splittern" – durch den Stoß eines Teilchens, welches den Kern trifft. Die K. ist erstmals Ende

1938 durch Hahn und Strassmann beim Beschuß von Uran mit Neutronen beobachtet worden. Kernspaltung

Später zeigte sich, daß die beiden hauptsächlich im natürlichen Uran enthaltenen Kernsorten, das $^{238}_{92}U$ (99,27 %) und das $^{235}_{92}U$ (0,72 %) beide durch Neutronen gespalten werden können, jedoch das U 238 nur durch Neutronen hoher Energie, das U 235 schon durch „langsame" Neutronen ganz geringer Energie. Der Urankern zerfällt bei der Spaltung nicht in zwei gleich große Teile, sondern in einen Teil von einer Massenzahl von etwa 95, einen anderen von etwa 140, außerdem noch 2 bis 3 einzelne Neutronen. Die großen Bruchstücke (*Spaltprodukte) können im einzelnen noch sehr verschieden sein. Sie sind, weil sie relativ zu viel Neutronen enthalten, äußerst instabil und zerfallen über eine ganze Reihe von β-Zerfällen, bis schließlich stabile Endprodukte entstehen. Heute sind bereits mehrere hundert verschiedene Bruchstücke und Abkömmlinge bekannt. Außerdem hat der Spaltungsprozeß eine hohe, positive Energietönung. Bei der Spaltung des U 235 werden rund 200 MeV Energie frei.

Die bei der K. entstehenden einzelnen Neutronen können unter Umständen zu einer Kettenreaktion führen und dadurch die Spaltung in technischem Ausmaß ermöglichen. Dies ist bei den mit thermischen Neutronen spaltbaren Kernen $^{235}_{92}U$, $^{233}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$, $^{241}_{94}Pu$ und weiteren künstlich erzeugten Transuranen möglich. Dagegen sind mit schnellen Neutronen spaltbar noch eine ganze Anzahl anderer sehr schwerer Kerne, z. B. Kerne von Thorium, Wismut, Blei usw. bis herunter zum Platin (Ordnungszahl 78). Darüber hinaus werden in ganz geringem Ausmaß sogar bei mittelschweren Kernen große Bruchstücke abgespalten. Auch treten gelegentlich Spaltungen in drei oder vier große Bruchstücke statt in zwei ein.

Die Neutronen sind nicht die einzigen wirksamen Geschosse zur Spaltung von Kernen. Mit sehr energiereichen α-Teilchen (400 MeV) und Deuteronen (200 MeV) sind ebenfalls Spaltungen gelungen, ebenso mit sehr energiereichen Photonen (Photospaltung ab etwa 20 MeV). Schließlich tritt die K. in geringem

Ausmaß bei den schwersten Kernen auch ganz ohne äußere Einwirkung, also von selbst, ein (s. spontane Spaltung).

Die bei der K. freiwerdenden γ-Strahlen werden bei der technischen Anwendung meistens nicht besonders beachtet. Immerhin entfällt auf sie ein Energiebetrag von 6 MeV.

S. Spaltneutronen, Spaltgammas.

Verteilung der Spaltenergie:

168 MeV	kinetische Energie der Spaltprodukte
5 MeV	schnelle Neutronen
7 MeV	spontane Gammas
5 MeV	β-Strahlung der Spaltprodukte
6 MeV	γ-Strahlung der Spaltprodukte
191 MeV	

Hierzu kommt noch ein Betrag von etwa 11 MeV, der auf Neutrinos entfällt und nicht genutzt werden kann. S. a. Energiefreisetzung pro Spaltung im Reaktor. [1,7]

engl.: (nuclear) fission

franz.: fission nucléaire

Lit.: s. Kern. Ferner: F. Dessauer, Atomenergie und Atombombe, Knecht, Frankfurt a. M., 1948.

Kernspaltung, spontane, s. Spaltung, spontane.

Kernspektrum. Wie die Elektronenhülle der Atome besitzen auch die Kerne einen Grundzustand und angeregte Zustände. Die angeregten Zustände können durch Stoß eines anderen Kerns oder durch Absorption einer γ-Spaltung erreicht werden. Der angeregte Kern geht, meist unter Ausstrahlung eines γ-Quants, wieder in den Grundzustand zurück. Das γ-Linienspektrum, das hierbei entsteht – oder besser die Gesamtheit der ihm zugrunde liegenden Terme – nennt man das K. Bei α-Strahlern drücken sich die Niveaudifferenzen des K.s nicht nur in den γ-Spektren, sondern auch in den α-Spektren aus, da häufig die Anregungsenergie bei der Emission eines α-Teilchens mit verwandt wird. [1]

engl.: nuclear spectrum

franz.: spectre du noyau

Kernspin. Kerne der Atome besitzen einen mechanischen Drehimpuls, einen Spin. Er ist ein halb- oder ganzzahliges Vielfaches von $h/2\pi$ (h Planck sches Wirkungsquantum) und läßt sich aus der Anzahl der

Aufspaltungs-Komponenten der Hyperfeinstruktur der Atomspektren ermitteln. Der höchste mit Sicherheit festgestellte K. ist $9/2 \cdot h/2\pi$, z. B. beim Strontiumkern $^{87}_{38}Sr$ und einigen anderen. Der K. bei *g*-*g*-Kernen ist durchweg null. [1]
engl.: nuclear spin
franz.: spin du noyau, spin nucléaire

Kernspurplatte, s. Photoschichtspuren.

Kernstoß, ein Stoß eines raschen Teilchens (α-Teilchen, Proton usw.) auf den Kern eines Atoms. Dieser kann elastisch verlaufen, wobei das Teilchen wie eine Billardkugel abprallt und nur einen Teil seiner Energie dem getroffenen Kern als kinetische Energie abgibt (elastische Streuung), oder aber unelastisch, wobei das Teilchen im allgemeinen im getroffenen Kern „stecken bleibt" und eine Kernumwandlung verursacht. [1]
engl.: nuclear collision
franz.: collision nucléaire

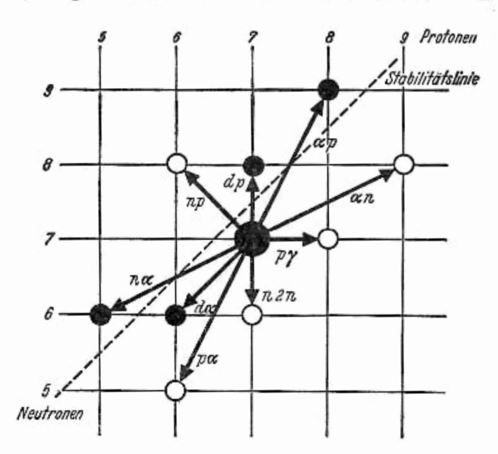
Kernumwandlung, im weiteren Sinn jede Umwandlung eines Kerns, worunter also auch der radioaktive Zerfall zu rechnen ist, im engeren Sinn eine solche Umwandlung, die durch äußere Einwirkungen (Auftreffen eines Teilchens) bewirkt wird. In diesem Sinn ist K. auch gleichbedeutend mit Kernprozeß, Kernreaktion.
Die K. im engeren Sinn ist 1919 von R u t h e r f o r d entdeckt worden, welcher fand, daß beim Durchgang von α-Strahlen durch Stickstoff Protonen sehr hoher Energie auftreten, welche nur dadurch zustande kommen können, daß ein α-Teilchen gelegentlich auf einen Stickstoffkern trifft und aus diesem ein Proton „herausschießt", während es selbst „stecken bleibt". Der Vorgang verläuft nach der Kernreaktions-Formel:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H - 1{,}3\ MeV\,.$$

1932 gelang es C o c k c r o f t und W a l t o n erstmals, mittels künstlich in Entladungsröhren beschleunigter Protonen und Deuteronen K.n hervorzurufen, und kurz darauf erwies sich das neu entdeckte Neutron als besonders wirksames „Geschoß". Während geladene Teilchen stets eine hohe Energie haben müssen (meist mehrere MeV), um eine K. zu veranlassen – sie

müssen gegen die abstoßende Kraft des positiv geladenen Kerns anlaufen – vermögen die ungeladenen Neutronen schon bei Bruchteilen eines Elektronenvolts K.n auszulösen.

Auch Photonen vermögen K.n zu verursachen. Nach Art der stoßenden und der herausgeworfenen Teilchen faßt man die über 2000 heute bekannten K.n in *Kernreaktionstypen zusammen, zu denen als Sonderfall auch die *Kernexplosion und die *Kernspaltung gehören. Die verschiedenen Arten der K. eines bestimmten Kerns durch verschiedene „Geschosse" lassen sich anschaulich in einem zweidimensionalen Schema, das Ausgangskern und entstehende Kerne nach ihrer Protonenzahl und Neutronenzahl ordnet, einer „Umwandlungsspinne", darstellen, wie sie die Abb. für neun verschiedene Umwandlungsmöglichkeiten des Stickstoffkerns $^{14}_{7}N$ (7 Protonen, 7 Neutronen) zeigt. An die Pfeile ist jeweils der Typ der Umwandlung angeschrieben; ausgefüllte Kreise bedeuten stabile, leere Ringe



radioaktive Endprodukte. Der steil schräg nach rechts oben führende Pfeil z. B. bedeutet die nach dem Schema (α, p) verlaufende, 1919 von Rutherford entdeckte K., die zu dem stabilen Sauerstoffkern $^{17}_{8}O$ (8 Protonen, 9 Neutronen) führt.

Jede K. ist mit einer bestimmten Energietönung verknüpft, die positiv oder negativ sein kann und meist in der Größenordnung einiger MeV liegt. Außerdem ist jede K. durch ihre Ausbeute charakterisiert, welche sich auch durch den Wirkungsquerschnitt des beschossenen Kerns gegen die betreffenden „Geschosse" für die betreffende K. ausdrücken läßt. Da dieser Wirkungsquerschnitt meist nur von der Größenordnung 10^{-24} cm^2 ist, ist ein Kerntreffer ein äußerst seltenes Ereignis und die Ausbeute daher äußerst niedrig. [1]
engl.: nuclear transmutation
franz.: transmutation des espèces nucléaires, désintégration
Lit.: s. Kern und Kernspaltung.

Kernverdampfung, Kernexplosion, Kernzertrümmerung. Ein beliebiger zusammengesetzter Kern kann durch Beschießung mit einem Nukleon extrem hoher Energie in der Weise angeregt werden, daß der gesamte Kern praktisch in seine Bestandteile zerlegt wird. Das bezeichnet man als eine Kernexplosion. Der Begriff ist abzugrenzen gegen die verwandten Worte Kernzertrümmerung, Kernverdampfung und Kernspaltung.
Die Abgrenzung vor allem gegen die Kernzertrümmerung ist nicht scharf. Als eine Kernzertrümmerung wird im Sprachgebrauch ein Vorgang ähnlich dem der Kernexplosion bezeichnet, bei der der Kern nicht so radikal aufgelöst wird. Es bleiben größere Bruchstücke, deren Zahl nicht festgelegt ist. Meist sind es nicht mehr als eins oder zwei. Daneben entstehen mehrere leichtere Kerntrümmer, wie α-Teilchen und elementare Kernbausteine. Entsprechend der weniger weitgehenden Auflösung des Kernverbandes ist zur Herbeiführung einer Kernzertrümmerung eine nicht so extrem hohe Energie erforderlich. Kernzertrümmerungen und Kernexplosionen enthalten durchweg neben den elementaren oder zusammengesetzten Kernbestandteilen auch π- und vereinzelt τ-Mesonen. Diese entstehen aus dem in hohem Grade gestörten Kernfeld analog zu den Feuererscheinungen (Lichtquanten), die bei einer chemischen Explosion auftreten.
Die Kernverdampfung ist die schwächste Form

Kern-
verdampfung

der Auflösung eines Kerns. Hier handelt es sich zunächst um eine irgendwie erfolgte Anregung des Kerns ohne Abgabe von Teilchen. Bei einem angeregten Kern kann man sich die Kernmaterie vorstellen als eine brodelnde Masse. In dieser brodelnden Masse flutet die zugeführte Energie hin und her. Es kann passieren. daß sie sich dabei auf ein oder zwei Teilchen konzentriert. Unter dieser Bedingung reicht sie u. U. aus, um ihren Trägern (einzelnen Nukleonen oder α-Teilchen) das Verlassen des Kernverbandes zu ermöglichen. Eine Kernverdampfung weist neben dem Restkern keine schweren Kerntrümmer auf. Zu einer Kernverdampfung sind Energien von 10^7 bis 10^8 eV erforderlich.

Die drei Begriffe der Explosion, Zertrümmerung und Verdampfung eines Kerns sind gebildet an Hand der Beobachtungen der kosmischen *Strahlung mittels Photoplatten. Die kosmische Strahlung enthält u. a. Teilchen mit extrem hohen Energien, die diese Kernprozesse auslösen können. K.n wurden von den Wiener Physikerinnen M. B l a u und H. W a m b a c h e r im Jahre 1937 entdeckt. Sie stellen sich in der Gelatineschicht der photographischen Platten so dar, daß von einem Zentrum mehrere Punktreihen von Schwärzungskörnern in radialer Richtung strahlenförmig ausgehen, die von den Trümmerteilchen herrühren und deren Weg anzeigen. Entsprechend dem Aussehen nannte man dieses Phänomen einen „Zertrümmerungsstern" oder kurz „Stern". Die energieärmsten Sterne (Verdampfungssterne) haben zwei bis fünf sichtbare Strahlen. Abgedampfte Neutronen geben natürlich keine Spuren. Daher kann man nur schätzungsweise die Zahl der von dem Kern tatsächlich abgegebenen Teilchen angegeben. Das Aussehen eines Sterns hängt, abgesehen von der zugeführten Energie, auch von der Größe des Kerns ab.

Die Verteilung der Strahlen um das Zentrum ist im Mittel symmetrisch mit Ausnahme der sehr energiereichen Zertrümmerung und Explosionen. Bei diesen geht die Richtung der emittierten Trümmer vorzugsweise in die Richtung des stoßenden Teilchens.

Die hier besprochenen Auflösungen des Kernverbandes sind noch abzugrenzen gegen den Begriff *K e r n -

s p a l t u n g. Die letztere ist im Gegensatz zu oben in der Regel künstlich herbeigeführt. Sie gehört nicht zu den typischen Phänomenen der kosmischen Strahlung und bezieht sich in der Praxis auf die Zerlegung der in der Natur vorkommenden Uran- und Thorium-Isotope und der künstlich erzeugten schwereren Elemente in zwei etwa gleich große Bruchstücke. Das Charakteristikum einer Kernspaltung im Gegensatz zu den Kernzertrümmerungen besteht darin, daß die zu ihrer Auslösung notwendig zuzuführende Energie nur benötigt wird, um eine Energieschwelle zu überwinden. Die Summe des Energieinhalts der beiden Bruchstücke ist also größer als die Bindungsenergie des zu spaltenden Kerns. Das gilt für alle stabilen Kerne des Periodischen Systems oberhalb Silber, wie man aus dem Verlauf der Bindungsenergien ablesen kann, die auf ein Nukleon bei verschieden schweren, stabilen Atomkernen entfallen. Diese und nur diese Kerne sind – wenigstens grundsätzlich – spaltbar, während alle Kerne zertrümmert werden können. Siehe auch Kernreaktionstypen. [7]
engl.: spallation
franz.: explosion du noyau, désintégration

Kernverfahrenstechnik. In Anlehnung an den neu gebildeten Begriff des *Nuclear Engineering, unter dem eine große Vielzahl von Fachgebieten zusammengefaßt wird, beginnt sich in Deutschland in Anlehnung an die *Verfahrenstechnik die K. als zusammenfassender Begriff für die vielfältigen Ingenieuraufgaben einzuführen, die zur Gestaltung von Anlagen für die Kernenergiegewinnung mit ihren zahlreichen Hilfsprozessen zu lösen sind. Die K. ist aber noch weiter zu fassen, nämlich auszudehnen auf diejenigen Verfahren, die sich aus der Anwendung intensiver Strahlung in den Prozessen der Verbrauchsgüterindustrie ergeben oder zukünftig ergeben werden, sei es nun die Beeinflussung von Polymerisations- und Kristallisationsvorgängen, sei es die Konservierung von Medikamenten und Lebensmitteln, sei es die Steuerung von Synthesen und der Einfluß auf metallische Werkstoffe. Mit anderen Worten: Die mit der Kernspaltung zusammenhängenden Vorgänge und Verfahren sind aus dem Be-

reich der physikalischen Forschung und Entwicklung herausgewachsen und verlangen zu ihrer wirtschaftlichen Nutzung die Mitarbeit von Ingenieuren aller Fachrichtungen. Es wird erforderlich, viele der an sich bekannten *Grundverfahren den neuen kernphysikalischen Forderungen anzupassen und sie entsprechend abzuwandeln. [2]

engl.: nuclear engineering

franz.: génie nucléaire

Lit.: G. W. Oetjen, Aufgaben der Kernverfahrenstechnik in: Physiker-Tagung Hamburg, Physik-Verlag, Mosbach, 1955. – W. Mialki, Kernverfahrenstechnik, Springer, Berlin, 1958.

Kernverschmelzung, s. Fusion.

Kernzerfall, s. Zerfall, radioaktiver.

engl.: disintegration

franz.: désintegration du noyau

Kernzertrümmerung, s. Kernverdampfung und Kernspaltung.

Kerosin wird als Verdünnungsmittel für das bewährte Tributylphosphat angewandt. Unter der Einwirkung sehr intensiver radioaktiver Strahlung zersetzt sich K. in niedrigere Homologe und teilweise in ungesättigte Kohlenwasserstoffe, die ihrerseits sehr zu Reaktionen mit den gleichzeitig anwesenden verschiedenartigen chemischen Substanzen neigen und somit zu einem vorzeitigen Verbrauch des Extraktionsmittels führen. [22]

engl.: kerosene

franz.: kérosène

Kessel. Dampfkessel im herkömmlichen Sinn gibt es bei Atomkraftwerken nur als Hilfsanlagen. Jedoch werden die zur Dampferzeugung dienenden Wärmetauscher in der englischen Literatur oft auch K. oder *Dampferzeuger genannt. [8]

engl.: boiler

franz.: chaudière

Kesseltrommeln dienen bei herkömmlichen Röhrenkesseln als Behälter für den Wasservorrat und zur Abscheidung des erzeugten Dampfes. Für denselben Zweck werden sie bei Kernkraftwerken als Bauelement von dampferzeugenden Wärmetauschern verwendet. [8]

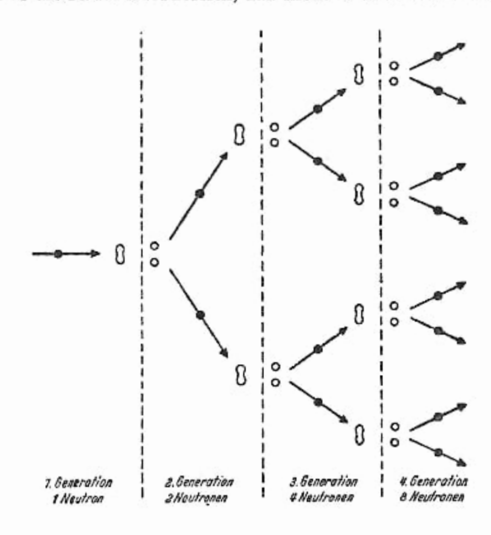
engl.: drum *franz.: ballon*

Kettenreaktion. In der Chemie nennt man eine K. eine Reaktion, bei welcher sich die Reaktionspartner selbst immer neu bilden, so daß die Reaktion, einmal in Gang gebracht, von selbst weiterläuft, bis das Ausgangsprodukt völlig verbraucht ist. Etwas Ähnliches kann unter geeigneten Bedingungen auch bei der Kernspaltung eintreten. Auf ihr beruht die Durchführung von Kernprozessen im technischen Maßstab und die Freisetzung von Kernenergie in großen Beträgen, also der Reaktor und die Atombombe.

Kettenreaktion

Zur Spaltung eines schweren Kernes ist ein Neutron geeigneter Energie notwendig. Bei dieser Spaltung entstehen einige (z. B. bei der thermischen Spaltung des Uran-235 durchschnittlich 2,46) neue Neutronen. Falls diese wieder die geeignete Energie besitzen, vermögen sie neue Kerne zu spalten. Hierbei entstehen wieder Neutronen, die ihrerseits wieder Kerne spalten, und so steigert sich die Zahl der Neutronen und die Zahl der gespaltenen Kerne lawinenartig, wie dies in der Abb. angedeutet ist, in welcher die Entstehung von zwei Neutronen je Spaltung angenommen ist.

Für die K. ist erforderlich, daß nicht zu viele Neutronen



durch fremde Kerne weggefangen werden, und daß nicht zu viele durch die Oberfläche der Anordnung entweichen. Deshalb muß diese eine Mindestgröße haben (s. kritische Größe). Der Wirkungsquerschnitt für die Auslösung einer Spaltung ist am größten bei thermischen Energien, abgesehen von den sehr schmalen Resonanzstellen im Bereich von ca. 1 bis 100 eV. Daher benutzt man in der Regel die thermische K., bei der die energiereichen Neutronen, die bei der Spaltung entstehen, mittels eines Moderators auf thermische Energien abgebremst werden.
Zur Erzeugung einer K. dienen das im natürlichen Uran zu 0,7 % enthaltene $^{235}_{92}U$, die künstlich gewonnenen Plutoniumisotopen $^{239}_{94}Pu$ und $^{241}_{94}Pu$, sowie das aus Thorium gewonnene Uranisotop $^{233}_{92}U$. S. a. Atomsprengstoffe, Spaltstoff. [1, 7]
engl.: chain reaction *franz.: réaction en chaîne*
Lit.: s. Kern. Ferner: F. Dessauer, Atomenergie u. Atombombe, Knecht, Frankfurt a. M., 1948.

keV, Abk. für Kilo-Elektronenvolt, also

$$1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}. \quad [1]$$

KEWB, Abk. für *Kinetic Experiment on Water Boilers,* kleiner homogener Lösungsreaktor als Prüfeinrichtung für kinetische Experimente an kleinen, wässerig-homogenen Reaktoren der USAEC. Wärmeleistung maximal 50 kW, gebaut durch North American Aviation. In Betrieb seit 1956 in Santa Susana, Kalifornien.
Im Bau befindet sich zur Fortsetzung der Untersuchungen gleichfalls durch North American Aviation in Santa Susana KEWB-2 für Inbetriebnahme 1958. [24]

K-Faktor, s. Nachtrag.

Kieselgurfilter eignen sich zur partiellen Entseuchung wäßriger Uransalzlösungen. Zirkon und Niob, welche in den wäßrigen Lösungen der Extraktionsprozesse oft als Kolloide vorliegen, werden in K.n festgehalten und aus diesen mit Oxalsäure ausgewaschen. K. werden ferner neben Aktivkohlefiltern zur Entfernung von radioaktivem Xenon und Jod bei Temperaturen von −80 °C mit Erfolg angewandt (s. a. Halex-Prozeß und Interim-23-TBP-Prozeß). [22]
franz.: filtres au kieselgur, f. à la silice

Kilobarn = 10^3 *barn = 10^{-21} cm².

kinetische Gleichungen des Reaktors

kinetische Gleichungen des Reaktors. Die *Reaktorgleichung beschreibt das differentielle, lokale Verhalten der Neutronendichte im Kernreaktor. Bei Reaktivitätsänderungen (z. B. Bewegen eines Regelstabes) liefert die *zeitabhängige Reaktorgleichung die örtliche Änderung der Neutronendichte. Vom Standpunkt der Reaktorkontrolle ist jedoch das integrale Verhalten des Reaktors von Interesse. Dieses wird von den k. G. beschrieben:

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = [k(1-\varepsilon\,\beta)-1]\,\frac{n}{l} + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i\, c_i + q$$

$$\frac{\mathrm{d}c_i}{\mathrm{d}t} = \varepsilon_i\,\beta_i\,k\cdot\frac{n}{l} - \lambda_i\,c_i\,; \quad \varepsilon\,\beta = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i\,\beta_i\,. \quad (1)$$

Die Bedeutung der einzelnen Größen in dieser Gleichung hängt davon ab, welche Form der Reaktorgleichung man als Ausgangspunkt wählt. Mit Hilfe der *Einflußfunktion kann man die k. G. ziemlich allgemein fassen. Unter $n(t)$ ist dann der *verallgemeinerte Neutroneninhalt des Reaktors zu verstehen, unter $k(t)$ der *verallgemeinerte Multiplikationsfaktor und unter $l(t)$ die *verallgemeinerte Lebensdauer der Neutronen. Durch den Faktor ε_i, der in vielen Fällen ≈ 1 gesetzt werden kann, wird der *Einfluß des Neutronenspektrums, d. h. der Unterschied in der Anfangsenergie der prompten und der verzögerten Neutronen, in Rechnung gestellt. Mit β_i ist der Anteil der verzögerten Neutronen aus der i-ten Gruppe, bezogen auf ein Spaltneutron, mit λ_i die Zerfallskonstante der entsprechenden Mutterkerne bezeichnet. Der Einfluß dieser Mutterkerne ist durch

$$c_i(t) = \int_R \int_0^\infty \Phi^+(\mathfrak{r}, E)\cdot f_i(E)\, C_i(\mathfrak{r}, t)\,\mathrm{d}E\,\mathrm{d}V$$

der Einfluß einer äußeren Quelle durch

$$q(t) = \int_R \int_0^\infty \Phi^+(\mathfrak{r}, E)\cdot Q(\mathfrak{r}, E, t)\,\mathrm{d}E\,\mathrm{d}V$$

gegeben. Dabei bedeutet Φ^+ die *Einflußfunktion, $C_i(\mathfrak{r}, t)$ die Konzentration der Mutterkerne i-ter Sorte und $f_i(E)$ das Energiespektrum der zugehörigen verzögerten Neutronen. In dieser allgemeinen Form erfassen die k. G. das Verhalten des Reaktors als Ganzes, unter Berücksichtigung des Einflusses der verschiedenen Reaktorzonen und Neutronenenergien sowie des Reflektors.

Da bei kleinen Reaktivitäten $\varrho = (k - 1)/k$ die stabile Periode des Reaktors kaum von der Neutronenlebensdauer abhängt (s. Periode und Lebensdauer), kann man in die obenstehende Gleichung $l^* = l/k \approx$ const. einführen und erhält die vereinfachte Form

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = \frac{\varrho - \varepsilon\,\beta}{l^*}\,n + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i\,C_i + q$$

$$\frac{\mathrm{d}C_i}{\mathrm{d}t} = \frac{\varepsilon_i\,\beta_i}{l^*}\,n - \lambda_i\,C_i\,. \qquad (2)$$

Die physikalische Bedeutung der k. G. liegt in folgendem. Die erste Gleichung stellt eine Bilanz des (verallgemeinerten) Neutroneninhalts des Reaktors dar, die ihrerseits mit dem Leistungsniveau zusammenhängt. Das erste Glied auf der rechten Seite erfaßt die prompten Neutronen: Von den Spaltneutronen ist der Anteil $(1 - \beta)$ prompt; ein Neutron, das für den Fortgang der Kettenreaktion auf dem bisherigen Niveau benötigt wird, muß abgerechnet werden. Das zweite Glied beschreibt den Beitrag der verzögerten Neutronen, das dritte den einer äußeren Quelle. Die zweite Gleichung stellt eine Bilanz der Mutterkerne dar: Das erste Glied beschreibt ihre Entstehung bei den Spaltungen, das zweite ihren Zerfall. Das zweite Glied tritt in der ersten Gleichung als Gewinn auf, da jeder zerfallende Mutterkern ein Neutron hervorbringt. Die zweite Gleichung ist insgesamt m-mal anzuschreiben, wenn m die Zahl der verzögerten Gruppen bedeutet.

Legt man der Reaktorberechnung ein Gruppendiffusionsverfahren zugrunde, wobei für kinetische Zwecke zwei Gruppen ausreichen werden,

so sind in den Definitionen von $k(t)$ und $l(t)$ die Operatoren $\boldsymbol{J}$ und $\boldsymbol{K}$ durch

$$\boldsymbol{J} = \begin{pmatrix} \nu_1 \Sigma_{f1} & \nu_2 \Sigma_{f2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} -\nabla D_1 \nabla + \Sigma_{a1} + \Sigma_1 & 0 \\ -\Sigma_1 & -\nabla D_2 \nabla + \Sigma_{a2} \end{pmatrix}$$

gegeben (s. Reaktorgleichung in Diffusionsnäherung). Manche Autoren fassen die k. G. nicht als Beziehung zwischen integralen Größen des Reaktors auf, sondern identifizieren sie mit der zeitabhängigen Reaktorgleichung. An die Stelle von $n(t)$ tritt dann einfach der Fluß $\Phi(\mathfrak{r}_0, t)$ an einer bestimmten Stelle $\mathfrak{r}_0$ des Reaktors. Da der kinetische Ausgleich von Störungen über den Reaktor hinweg sehr schnell erfolgt, ist dieses Vorgehen berechtigt. Allerdings kann man damit den Einfluß eines Reflektors schwer erfassen und verliert den Zusammenhang mit der Störungsrechnung, nach der sich $k(t)$ bestimmen läßt. Im einfachsten Fall betrachtet man dann die k. G. des nackten, homogenen, thermischen Reaktors in Alters-Näherung:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = [k(1-\beta) - 1] \frac{\Phi}{l} + v\, p\, e^{-B^2 \tau} \sum_{i=1}^{m} \lambda_i C_i$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{k\, e^{B^2 \tau}}{l\, p\, v} \beta_i \Sigma_a \Phi - \lambda_i C_i . \tag{3}$$

C_i ist hier die Konzentration der Mutterkerne, p die Bremsnutzung und $e^{-B^2 \tau}$ der Neutronenausfluß während der Bremsung. Die k. G. werden in der Reaktorkinetik für verschiedene vorgegebene Funktionen $k(t)$ untersucht. [13]

engl.: kinetic equations

franz.: équations cinétiques

Lit.: Reactor Handbook, Bd. I, Physics (AECD-3645), McGraw-Hill, New York, 1955. – H. Grümm u. K. H. Höcker, Reaktorkinetik und -Störungsrechnung, Erg. d. ex. Naturwiss. Bd. 30, 1957.

Kjeller, Sitz der gemeinsamen holländisch-norwegischen Atomforschungsanlage *JENER (mit dem Reaktor JEEP). K. ist ein Vorort von Lilleström in der Nähe Oslos. [24]

Klassieren, s. Sieben.
engl.: size separation
franz.: classer (trier, séparer, cribler)

Klein-Nishina-Formel stellt das Ergebnis der Berechnung des Compton-Effektes auf Grund der unquantisierten Diracschen Wellenmechanik dar. Der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Streuung eines Lichtquants mit der Energie E_0 vor dem Streuakt und mit der Energie E nach dem Streuakt in den Winkelraum zwischen $\Theta + d\Theta$ ist

$$d\sigma = \frac{1}{4}\left(\frac{e^2}{m\,c^2}\right)^2 d\Omega\,\frac{E^2}{E_0{}^2}\cdot\left[\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2 + 4\cos^2\Phi\right].$$

E hängt (auf Grund von Energie- und Impulssatz) sehr empfindlich vom Streuwinkel Θ ab:

$$E = \frac{E_0\cdot m\,c^2}{m\,c^2 + E_0(1-\cos\Theta)}\,.$$

Φ bezeichnet den Winkel zwischen den Polarisationsrichtungen vor und nach dem Stoß. e Elementarladung, m Elektronenmasse, c Lichtgeschwindigkeit, $d\Omega$ Raumwinkelelement. Die Formel stellt für Lichtquanten gegebener Energie und Polarisation die Intensität der gestreuten Strahlung bei gegebenem Streuwinkel Θ und gegebener Polarisationsrichtung dar. Eine Berechnung auf Grund gequantelter Felder ergibt dasselbe Resultat. [7]
engl.: Klein-Nishina-formula
franz.: formule de Klein-Nishina

Lit.: O. Klein u. Y. Nishina, Ztschr. f. Physik 52, 853 und 869, 1929. – Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien, Bd. II, Vieweg, Braunschweig, 1944. – Heitler, Quantum Theory of Radiation, Oxford University Press, 1944/49. – Wentzel, Einf. in die Quantentheorie der Wellenfelder, Deuticke, Wien, 1943.

Knochenmark, die Hauptbildungsstätte der roten und weißen Blutkörperchen. Es besitzt die gleiche Strahlenempfindlichkeit wie die Lymphknoten. Die ersten wahrnehmbaren Veränderungen treten nach Dosen zwischen 50 und 100 r auf. Bei höheren Dosen kommt es zu einer starken Verarmung an den verschiedenartigen Knochenmarkzellen, zu einer Umwandlung in

gelatinöses Fettmark und später zu einer z. T. anomalen Regeneration. Bei tödlich wirkenden Strahlendosen verödet das K. innerhalb weniger Tage. [28]
engl.: bone marrow
franz.: moelle osseuse

Knochensucher, Elemente oder Verbindungen, die sich in vivo bevorzugt im Knochen anreichern. Die wichtigsten radioaktiven Elemente dieser Gruppe sind: ^{32}P, ^{89}Sr, $^{90}Sr + {}^{90}Y$, die seltenen Erden, ^{226}Ra, ^{227}Ac, Th, U und die Transurane. [17]
engl.: bone seeker
franz.: ostéophile

Knoll's Atomic Power Laboratory, Forschungs- und Entwicklungsinstitut der amerikanischen Atomenergiekommission (USAEC) in Schenectady, N.Y., betrieben durch General Electric Co. Speziell für Entwicklung von Leistungsreaktoren, insbesondere für Schiffsantrieb. Abk.: KAPL. [24]

Knudseneffekt zur Trennung von Isotopen. Im Übergangsgebiet zwischen Knudsen- und Poiseuillescher Strömung eines Gases durch Kapillaren tritt eine Entmischung eines Gasgemisches im Gleichgewichtszustand auf, wenn ein Temperaturgradient längs der Kapillaren vorhanden ist. Er führt zu einer Anreicherung der leichten Komponente am kalten, der schweren am warmen Ende der Kapillaren, die dadurch bedingt ist, daß der Anteil der nicht separativen Poiseuilleschen Strömung infolge der Temperaturabhängigkeit der Konzentration bzw. der mittleren freien Weglänge bei der Strömung vom kalten zum warmen Ende größer ist als in umgekehrter Richtung. [14]
engl.: Knudsen effect *franz.: effet Knudsen*

Knudsenströmung ist eine Gasströmung durch ein langes Rohr bei solchen Drucken, daß die mittlere freie Weglänge der Atome oder Moleküle groß gegen den Rohrdurchmesser ist. [7]
engl.: Knudsen flow
franz.: écoulement de Knudsen, régime moléculaire

Kobalt 58 und 60, zwei radioaktive Isotope des Kobalt. Entstehung über ^{58}Ni (n, p) ^{58}Co mit schnellen Neutronen und ^{59}Co (n, γ) ^{60}Co mit langsamen Neutronen.

Beide Isotope werden häufig zur radioaktiven *Markierung des chemisch dem Kobalt ähnlichen Nickel verwendet. Die größere Bedeutung besitzt ^{60}Co als Strahlenquelle in der Technik, Medizin, Chemie und Biologie. Es ist bis zu hohen spezifischen Aktivitäten leicht darstellbar und zeichnet sich durch harte, durchdringende Gammastrahlung aus. Es gibt Kobaltquellen mit Aktivitäten von vielen Kilo-Curie.

Strahlungsdaten:

Isotop:	^{58}Co	^{60}Co
Halbwertszeit:	71 Tage	5,25 Jahre
Betastrahlung:	β^+ 0,47 MeV	β^- 0,31 MeV
Gammastrahlung:	0,81 MeV	1,17 MeV
		1,33 MeV

[16]

engl.: cobalt
franz.: cobalt

Kohlendioxyd, CO_2, Dioxyd des Kohlenstoffes. CO_2 findet Anwendung als Kühlmittel in gasgekühlten Reaktoren. Da es einen sehr geringen Einfangquerschnitt für Neutronen hat, wird es selbst kaum aktiv. CO_2 ist bis zu den höchsten im Reaktor vorkommenden Temperaturen beständig. [18]
engl.: carbon dioxide
franz.: gaz carbonique, dioxyde de carbone

Kohlenstoff 14 ist das einzige radioaktive Isotop des Elements Kohlenstoff, das in der Isotopentechnik laufend Anwendung findet. Das Isotop zeichnet sich durch seine sehr weiche Betastrahlung von 155 KeV Energie aus. ^{14}C wird durch Bestrahlung von Stickstoff (Reaktion: ^{14}N (n, p) ^{14}C) oder Sauerstoff (Reaktion: ^{17}O (n, α) ^{14}C) mit schnellen Neutronen gewonnen. Das Isotop entsteht auch bei Bestrahlung von C mit langsamen Neutronen. Der Wirkungsquerschnitt dieser Reaktion ist jedoch so gering, daß sie praktisch nicht angewandt wird. Am ergiebigsten ist die Darstellung über Stickstoff. ^{14}C wird auch in der Natur gebildet. Die schnellen Neutronen der kosmischen *Strahlung aktivieren in der hohen Atmosphäre den dort vorhandenen ^{14}N nach derselben Reaktion wie im Kernreaktor. Bei der Durchmischung der Atmosphäre

gelangt dieser Kohlenstoff als Kohlendioxyd in die Biosphäre, was die Grundlage einer *Altersbestimmung organischer Substanzen bildet. In Kohle- oder Mineralöllagerstätten ist ^{14}C bereits restlos abgeklungen, da mit dem Tod der Pflanze die Aufnahme atmosphärischen Kohlenstoffs aufhört. In Gegenden, wo z. B. ständig Mineralöle oder Kohle verbrannt werden, wie an Autobahnen oder in Industriebetrieben, ist das über Jahrtausende als unverändert angenommene Gleichgewicht zwischen radioaktivem und stabilem Kohlenstoff gestört.
In der Isotopentechnik werden heute Hunderte von organischen Verbindungen benutzt, in denen ein oder mehrere Kohlenstoffatome radioaktiv markiert sind. ^{14}C ist ein wertvolles Hilfsmittel zur Analyse komplizierter biologischer und chemischer Vorgänge. Das Isotop ist auch als sehr weiche Betastrahlquelle ohne Gammastrahlung wertvoll. [16]
engl.: radio-carbon *franz.: carbone-14*

Koinzidenz. Allgemein ein Zusammenfallen zweier Ereignisse, meist für zeitliches Zusammenfallen gebraucht (zeitliche K.). Speziell in der experimentellen Strahlungsphysik das zeitliche Zusammenfallen des Ansprechens zweier oder mehrerer (Mehrfachkoinzidenz) Kanäle, gebildet von Zählrohren, Szintillationszählern oder anderen Zählgeräten, die von einem durchdringenden Teilchen oder dessen Sekundärteilchen durchsetzt werden. Werden zwei oder mehrere Zähler durch eine besondere Schaltung so kombiniert, daß nur bei Auftreten einer K. ein Zählwerk betätigt wird, so spricht man von der Koinzidenzmethode (Bothe und Kolhörster, 1929), die zu einem wichtigen Untersuchungsmittel der kosmischen *Strahlung und aller Arten von Kernprozessen geworden ist. Eintreten einer K. bedeutet natürlich nicht absolute Gleichzeitigkeit, sondern nur, daß die beiden Ereignisse innerhalb derselben, sehr kurzen Zeitspanne liegen, die dem Auflösungsvermögen des Zählers (10^{-4} bis 10^{-6} s beim Zählrohr, 10^{-8} bis 10^{-9} s beim Szintillationszähler) entsprechen. In manchen Fällen wird auch eine „Antikoinzidenzschaltung" angewandt, die gerade bestimmte K.n nicht zählt.

Schließlich kann mit den v e r z ö g e r t e n K.n die sehr kurze Zeitdifferenz zwischen zwei nicht genau gleichzeitigen Ereignissen gemessen werden, indem man den von dem früheren Ereignis herrührenden Impuls durch eine „Verzögerungsleitung", z. B. ein koaxiales Kabel, meßbar gerade um so viel verzögert, daß er mit dem späteren Impuls eine K. bildet. Hiermit können heute exakte Kurzzeitmessungen bis herunter zu einigen 10^{-10} s ausgeführt werden.

Ist das Auflösungsvermögen einer n-fachen Koinzidenzschaltung t und sind die Zahlen der Impulse in den einzelnen Kanälen $N_1, N_2 \ldots N_n$, so treten

$$N_z = n \cdot N_1 \cdot N_2 \ldots N_n \cdot t^{(n-1)}$$

z u f ä l l i g e K.n auf. Für 2fach K.n gilt:

$$N_{2\text{fach}} = 2\, t\, N_1 \cdot N_2 \,. \qquad [1, 6]$$

engl.: coincidence *franz.: coincidence*

Lit.: W. Riezler, Kernphysik, 6. Aufl., Oldenbourg, München, 1958. – E. Fünfer u. H. Neuert, Zählrohre und Szintillationszähler, Braun, Karlsruhe, 1954.

Koinzidenzmethode, s. Koinzidenz.

Koinzidenzschaltung in Meßkanälen, im *Sicherheitssystem angewandte Mischschaltung zwischen mehreren *Meßkanälen zur Anzeige von Meßgerätefehlern.

Wenn unter einer größeren Anzahl von Meßwerten einige genau übereinstimmen und die anderen größere Differenzen untereinander aufweisen, dann beweist die Übereinstimmung mit größter Wahrscheinlichkeit, daß die zugehörigen Meßgeräte intakt sind. Zur Anzeige der fehlerhaften Kanäle genügt deshalb die Auswahl aller der Kanäle, die gegenüber allen anderen größere Differenzen aufweisen, was mit geeigneten K.n zwischen den Differenzsignalen ohne Schwierigkeit durchgeführt werden kann. Verwendet man dieses System außerdem noch zur automatischen Alarmgabe und zu automatischen Abschaltungen der fehlerhaften Kanäle von der weiteren Meßwertübertragung sowie zur automatischen Abgabe eines Sicherheitssignals, falls alle Kanäle voneinander abweichen, dann erhält man das *2-von-3-System. [9]

engl.: coincidence system
franz.: montage en coïncidence

Kokille. Dauergießform, meistens aus Metall und meistens zwei- oder mehrteilig. Die bei Kokillenguß erzielte Maßgenauigkeit ist größer als diejenige bei Sandguß; zudem ist die K. bei großen Stückzahlen wirtschaftlicher. – Gußeisen hat bei Kokillenguß infolge rascher Abkühlung eine harte Oberflächenschicht, welche aus weißem Gußeisen besteht. [4]
engl.: permanent mould
franz.: coquille

Kollimator, Vorrichtung, mit der aus einem Strahl ein Bündel mit einem bestimmten Raumwinkel ausgeblendet werden kann. K.n können zylindrisch oder konisch gebaut sein. Sie können auch aus einzelnen Kanälen bestehen, die in Richtung auf einen Punkt angeordnet sind. Dadurch läßt sich erreichen, daß nur die Strahlung, die in bestimmter Entfernung vom K. ausgeht, gemessen wird. Als Material für K.n wird bei γ-Strahlen Blei verwendet. [17]
engl.: collimator *franz.: collimateur*

Kollisionsdichte, s. Stoßzahldichte.

Kolonnenionisation, Bereich mit so großer *Ionisationsdichte, daß durch ein starkes äußeres elektrisches Feld die Rekombination der Ladungsträger nicht verhindert werden kann. Dieser Effekt spielt bei der Messung dicht ionisierender Teilchen, z. B. α-Teilchen, in Ionisationskammern eine Rolle. [17]
engl.: columnar ionization
franz.: ionisation en colonnes

Kolorimeter dienen unter anderem zur analytischen Konzentrationsbestimmung *heißer radioaktiver Lösungen. Die Konzentration einer lichtabsorbierenden Lösung ist ihrem Extinktionsmodul m proportional, es gilt also $c_1/c_2 = m_1/m_2$, wenn c_1/c_2 die Konzentrationen und m_1/m_2 die Extinktionsmoduln der beiden miteinander zu vergleichenden Lösungen bedeuten. Bei zwei Lösungen gleicher Art, aber verschiedener Konzentration ist also die Lichtdurchlässigkeit umgekehrt proportional ihrer Konzentration; es wird bei gegebenen Schichtdicken und definierten Lichtquellen die Lichtdurchlässigkeit und daraus die Konzentration der Lösung bestimmt. [22]
engl.: colorimeter *franz.: colorimètre*

kommutativ. Man sagt, zwei mathematische Größen seien k., wenn bei der Verknüpfung dieser Größen durch irgendeine Rechenoperation deren Reihenfolge gleichgültig ist. Zum Beispiel ist bei der gewöhnlichen Multiplikation immer: $A \cdot B = B \cdot A$. Dieses k.e Gesetz der Multiplikation ist z. B. für Matrizen, die zur Beschreibung des Neutronenflusses in der Gruppendiffusionsmethode benutzt werden, nicht erfüllt. [7]
engl.: commutative
franz.: commutatif

Kompensationskammer zur Messung thermischer Neutronen besteht aus zwei räumlich dicht benachbarten Ionisationskammern oder Zählrohren mit äquivalenten Rauminhalten. In der einen der Kammern ist eine Schicht angebracht, die ^{10}B oder eine andere, durch Neutronen aktivierbare, Substanz enthält. Die Ströme beider Kammern werden gegeneinander geschaltet. Damit heben sich die vom Gammastrahlenuntergrund herrührenden Anteile auf und als Differenz bleibt ein Strom, der dem Neutronenstrom durch die Borschicht proportional ist. [6]
engl.: compensated ionization chamber
franz.: chambre de compensation

Kompensator bedeutet im allgemeinsten Sinne Ausgleichsvorrichtung. Auf dem Gebiet des Rohrleitungsbaues bedeutet dieser Begriff *Ausdehnungsstück. [8]
engl.: expansion joint
franz.: compensateur

Kondensation. Die Verdichtung von Dampf, Gas zu Flüssigkeit durch Abkühlung und/oder Druck. Allgemein: die Verdichtung von Materie (s. a. Kondensator, Kondensationsturbine). [24]
engl.: condensation
franz.: condensation

Kondensationskraftwerk. Dampfkraftwerk, in dem elektrischer Strom durch mit Dampf angetriebene Kondensationsturbinen und von ihnen betriebene Generatoren erzeugt wird. Infolge der mit der Kondensation verbundenen Energieverluste beträgt der Wirkungsgrad dieser heute am weitesten verbreiteten Art des Dampfkraftwerkes nur 25 bis 30 %. [24]

Kondensationsturbine. Dampfturbine (Turbine), in

der der Dampf bis zu einem Druck ausgenützt wird, der niedriger ist als der Druck der Atmosphäre (bis ca. $^1/_{20}$). Dieser Unterdruck wird durch Verwendung eines Kondensators erreicht. Bei der Kondensation geht aber nahezu die Hälfte der verfügbaren Energie an das hierbei verwendete Kühlmittel verloren. [24]

Kondensator. 1. In der Elektrotechnik: Einrichtung zur Ansammlung von Elektrizität.
2. Bei Dampfkraftanlagen: Einrichtung zum Niederschlagen des aus der Turbine (s. Kondensationsturbine) bzw. Maschine austretenden Dampfes und zur Erzeugung des für den Unterdruck erforderlichen Vakuums. S. a. Kondensationskraftwerk. [24]
engl.: condenser
franz.: condensateur

Kondensatorkammer (Kondensator-Dosismesser), kleine Ionisationskammer mit Aërion-Wänden, je nach Größe der zu registrierenden Dosis in Kugel- oder Zylinderform. Die Innenelektrode der Kammer (ebenfalls *Aërion, mittels Bernstein gegen die Außenelektrode isoliert) wird mit einem Lade- und Ablesegerät auf die gewünschte Spannung aufgeladen. Der am Ablesegerät nach Gebrauch der Kammer festgestellte Spannungsabfall ist direkt proportional der Dosis, mit der die Kammer bestrahlt wurde. Die K. sind neben den *Filmplaketten zur Individualdosimetrie bei Röntgen- und γ-Strahlen geeignet. Sie sind wellenlängenunabhängig in den in Röntgen-Betrieben üblichen Energiebereichen.
Die Meßgenauigkeit der K. ist wesentlich vom Verhältnis der Kapazitäten der Kammer und des Meßsystems abhängig. Verwendet wird die K. vor allem bei Strahlenschutzmessungen. [28]
engl.: condenser (ionization) chamber
franz.: chambre-condensateur, dosimètre-stylo

konjugiert, svw. zugeordnet, kommt in vielen Wortverbindungen vor. Zum Beispiel konjugiert **komplex**: Ist $z = a + i\,b$ irgendeine komplexe Zahl (a, b reell, $i = \sqrt{-1}$), so ist die dazu k. komplexe Zahl $z^* = a - i\,b$. Sie ist so bestimmt, daß $z^* \cdot z$ reell wird ($= a^2 + b^2$).
Hermitisch k. ist eine Zuordnung, die bei den

in der Quantenmechanik gebräuchlichen Matrizen vorgenommen wird: Die zu einer Matrix A hermitisch k.e Matrix ist $B = A^{\dagger}$. Die Bedeutung dieser Schreibweise sieht man an den Elementen der Matrizen: Es ist $b_{ik} = a_{ki}^{*}$, d. h. die Matrix A ist zu stürzen (Zeilen und Spalten sind zu vertauschen) und dann ist von den Elementen das k. komplexe zu nehmen. Statt hermitisch k. sagt man auch adjungiert. Eine Matrix A, deren Elemente die Gleichung $a_{ik} = a_{ki}^{*}$ (d. h. die unterhalb und oberhalb der Matrixdiagonale stehenden Elemente sind k. komplex zueinander) erfüllen, heißt hermitisch oder selbst-adjungiert. [7]
engl.: conjugated *franz.: conjugué*

Konode, s. Zustandsbild.

Konstanten, atomare. Unter den a. K. versteht man die wichtigsten Grundgrößen der Atomphysik. Dies sind:

1. die elektrische Elementarladung
   $e = 4{,}803 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische CGS-Einheiten $= 1{,}6020 \cdot 10^{-19}$ C,
2. die Ruhmasse des Elektrons
   $m_0 = 0{,}9108 \cdot 10^{-27}$ g,
3. die Ruhmasse des Protons
   $M_0 = 1{,}6724 \cdot 10^{-24}$ g,
4. das Planck sche Wirkungsquantum
   $h = 6{,}625 \cdot 10^{-27}$ erg s,
5. die Lichtgeschwindigkeit
   $c = 2{,}9979 \cdot 10^{10}$ cm s^{-1}.

Die a. K. sind nicht zu verwechseln mit den atomaren Einheiten, mit denen sie zwar teilweise, nicht aber durchweg übereinstimmen. [1]
engl.: atomic constants
franz.: constantes atomiques

Kontaktkorrosion. *Korrosion durch Bildung eines galvanischen Elementes an der Kontaktstelle zweier Metalle, die in Berührung mit einem Elektrolyten stehen. Auch Wasser ist wegen der in ihm gelösten Gase (Sauerstoff, Kohlensäure) ein schwacher Elektrolyt. [4]
engl.: contact corrosion
franz.: corrosion de contact

Kontaktpotentialelement. Vorrichtung zur Nutzung der radioaktiven Strahlungsenergie als elektrische Energie durch Bestrahlung der gasförmigen Zwischenschicht zweier Elektroden verschiedenen Austrittspotentials, s. Atombatterie. [16]
engl.: contact potential device
franz.: élément (de f. e. m.) de contact

Kontamination nennt man
1. die *V e r g i f t u n g von Kernbrennstoffen durch Spaltprodukte, die wegen ihrer teilweise beachtlichen Absorptionsquerschnitte für Neutronen die Kernbrennstoffe vorzeitig unbrauchbar machen, und
2. die *V e r s e u c h u n g von Arbeitsflächen, Räumen, Wasser usw. durch radioaktive Stoffe. Die deutschen Begriffe sind bei den Reaktorphysikern und -ingenieuren geläufig, weniger bei den Chemikern. Man ist übereingekommen, zwecks klarer Abgrenzung der radioaktiven Verseuchung von einer bakteriellen bzw. medizinisch hygienischen Verseuchung die erstere mit Kontamination zu bezeichnen. Analog wird Dekontamination für *Entseuchung von radioaktiven Stoffen gebraucht. [22]
engl.: contamination
franz.: contamination

Kontinuitätsgleichung formuliert den Satz von der Erhaltung der Masse, elektrischen Ladung und anderen Qualitäten bei strömenden Medien. Er lautet z. B. für eine materielle Strömung

$$\operatorname{div}(\varrho\, \mathfrak{w}) + \frac{\partial \varrho}{\partial t} = 0$$

(ϱ Dichte, $\mathfrak{w}$ Geschwindigkeitsvektor). Das heißt die zeitliche Änderung der Dichte ist bewirkt durch eine Quelle oder Senke der Strömung. Mit veränderlicher Dichte gilt die K. in dieser Form für kompressible, instationäre Strömungen mit oder ohne Reibung und Wärmezufuhr. Im stationären Fall entfällt das Glied $\partial\varrho/\partial t$. Bei inkompressiblen Strömungen ist $\varrho = \text{const}$, und die K. vereinfacht sich zu:

$$\operatorname{div} \mathfrak{w} = 0\,.$$

In der E l e k t r i z i t ä t s l e h r e tritt an die Stelle

des Satzes von der Erhaltung der Masse der Satz von der Erhaltung der Ladung. Mit ϱ = Ladungsdichte und $\varrho\,\mathfrak{w}$ = Stromdichte $\mathfrak{j}$ entsteht

$$\operatorname{div} \mathfrak{j} + \frac{\partial \varrho}{\partial t} = 0\,.$$

Diese Gleichung gilt auch für den in der Ableitung nicht explizite angeschriebenen Fall, daß die Geschwindigkeiten der einzelnen Elementarladungen nicht sämtlich gleich sind. Durch Integration über den Raum ist diese Differentialbeziehung auch in integraler Form zu beschreiben. Es ist

$$\int_\tau \varrho \,\mathrm{d}\tau = \text{der Gesamtladung } Q \text{ und}$$

$$\int_\tau \operatorname{div} \mathfrak{j} \,\mathrm{d}\tau = \oint_{f(\tau)} I_n \,\mathrm{d}f \text{ (Gaußscher Satz)}.$$

Das rechts stehende Integral bedeutet den gesamten durch die Oberfläche f des Integrationsgebietes τ in der Richtung der Normalen hindurchtretenden Strom. Die K. ist also jetzt zu schreiben:

$$\oint I_n \,\mathrm{d}f + \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = 0\,.$$

Die Gleichung besagt, daß die innerhalb einer geschlossenen Fläche f befindliche Elektrizitätsmenge dadurch verschwinden kann, daß sie durch leitende Teile dieser Oberfläche abfließt.
Die Neutronenbilanzgleichung in einem Reaktor (*Reaktorgleichung) ist nichts anderes als eine erweiterte K. [7]
engl.: continuity equation
franz.: équation de continuité

Kontrolle, Kontroll-, im Deutschen identisch mit Überwachung bzw. Überwachungs-. Im engl. Sprachgebrauch bedeutet *control* dagegen primär Steuern und Regeln und nur im übertragenen Sinn Überwachung, Bedienung. In den deutschen Sprachgebrauch sind in jüngster Zeit in Unkenntnis der Doppeldeutigkeit gelegentlich Übersetzungen wie Kontrollstäbe *(control rods)* eingeführt worden, deren Sinn eindeutig der von

Steuer- und Regelstäben ist. Derartige falsche Übersetzungen sind zu vermeiden. [9]

Kontrollraum, besser Schaltwarte, zentraler Überwachungs- und Bedienungsraum für die Reaktorsteuerung. Die Schaltwarte enthält normalerweise in der Mitte ein Hauptbedienungspult mit den Schaltern und Stellungsanzeigern der wichtigsten Steuerelemente und den orientierenden Instrumenten für die Leistung, Periode, Kühlung und die Betriebsbereitschaft der Kontrollanlage selbst. Vor diesem Pult befinden sich an der Wand Gestelle mit den genauen Registriergeräten und den Alarm- und Anzeigegeräten für die einzelnen Überwachungen und Operationen im Rahmen des Sicherheitssystems. Die zugehörigen Hilfsgeräte und Schalter sind entweder hinter diesen Meßgestellen oder in einem benachbarten Raum untergebracht. Neben der Schaltwarte werden gelegentlich noch weitere Meß- und Steuerräume direkt bei den zu überwachenden Kreisläufen vorgesehen, deren Funktion jedoch eindeutig von der Schaltwarte aus überwacht werden kann. [9]

engl.: control room
franz.: salle de contrôle

Lit.: S. Glasstone, Principles of Nuclear Reactor Engineering, D. van Nostrand Comp., New York, 1955. – M. A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, McGraw-Hill, New York, 1955. – Die Atomwirtschaft 2, Sonderheft Karlsruhe, Dezember 1957.

Konvektion, Bezeichnung für eine Form des Wärmetransportes. Dabei wird die Wärme durch eine Flüssigkeits- oder Gasströmung zu- oder abgeführt. Man unterscheidet hierbei freie und erzwungene Strömung. Der erste Fall liegt vor, wenn die Strömung nur durch die Dichteunterschiede im strömenden Medium erzeugt wird. Bei Reaktoren ist es für die Sicherheit sehr vorteilhaft, wenn die *Nachwärme nach dem Abschalten durch freie K. abgeführt werden kann.

Bei freier (oder natürlicher) K. wird die Flüssigkeitsströmung nur durch Dichteunterschiede in der ungleichförmig temperierten Flüssigkeit hervorgerufen. Das Ähnlichkeitsgesetz der Wärmeübertragung lautet hier $\mathrm{Nu} = F(\mathrm{Gr}, \mathrm{Pr})$, d. h. die *Nußelt-Zahl Nu ist

eine Funktion der *G r a s h o f - Zahl Gr und *P r a n d t l - Zahl Pr. An Hand von Versuchen wurde die explizite Form dieser Gleichung für verschiedene Heizflächenanordnungen ermittelt. Für den Wärmeübergang an einer senkrechten Platte ergab sich dabei für $1700 < \mathrm{Gr\,Pr} < 10^8$

$$\mathrm{Nu} = 0{,}55\ (\mathrm{Gr\,Pr})^{1/4}$$

und für $\mathrm{Gr\,Pr} > 10^8$

$$\mathrm{Nu} = 0{,}13\ (\mathrm{Gr\,Pr})^{1/3}.$$

Dabei geht in Nu und Gr die Höhe H der Platte als kennzeichnende Länge ein.

Bei erzwungener Strömung wird im allgemeinen der Dichteunterschied der Flüssigkeit längs der Heizfläche die Strömung wenig beeinflussen, so daß im Ähnlichkeitsgesetz der Wärmeübertragung nicht mehr die G r a s h o f - Zahl, sondern die für die Strömung charakteristische *R e y n o l d s - Zahl Re erscheint. Man erhält bei erzwungener K. eine Beziehung von der Form $\mathrm{Nu} = F(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})$. Zahlreiche Gebrauchsformeln für alle technisch wichtigen Heizflächenformen wurden mit Hilfe dieses Ähnlichkeitsgesetzes aufgestellt, und zwar sowohl für laminare als auch für turbulente *Strömung. Laminare Strömung ist zur Kühlung von Leistungsreaktoren ungeeignet. Infolge der schlechten Wärmeübergangszahlen ließen sich die erforderlichen hohen Heizflächenbelastungen nur erreichen, wenn man eine hohe Temperaturdifferenz zwischen Kühlmittel und der Oberfläche der Brennstoffstäbe zulassen könnte. Die Wandtemperatur darf aber einen bestimmten zulässigen Wert nicht überschreiten (Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit), so daß man die Temperatur des Kühlmittels tief halten müßte, was einen schlechten thermischen *Wirkungsgrad zur Folge hätte. Dieser läßt sich beim Übergang zur turbulenten Strömung so steigern, daß der zur Erzeugung einer turbulenten Strömung erforderliche Mehraufwand an Pumpenleistung stets gerechtfertigt ist. Für den Wärmeübergang bei erzwungener turbulenter Strömung in

Rohren haben sich neben anderen die von K r a u ß o l d angegebene Gleichung

$$\mathrm{Nu} = 0{,}032 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}8}\, \mathrm{Pr}^{n} (L/D)^{-0{,}054} ,$$

mit $n = 0{,}37$ für Heizung und $n = 0{,}30$ für Kühlung der Flüssigkeit (Rohrlänge L, Innendurchmesser D), und die in der amerikanischen Literatur viel benützte Gleichung von C o l b u r n

$$\mathrm{Nu} = 0{,}023\, \mathrm{Re}^{0{,}08}\, \mathrm{Pr}^{n} ,$$

mit $n = 0{,}4$ für Heizung und $n = 0{,}3$ für Kühlung der Flüssigkeit, bewährt. Die Gleichung von K r a u ß o l d ist bei Wasser für R e y n o l d s - Zahlen bis zu $5 \cdot 10^5$ bestätigt.

Bei flüssigen Metallen ergeben sich infolge ihrer hohen Wärmeleitfähigkeiten etwas andere Gleichungen. Für kreiszylindrische Rohre wurde von E l s e r die Beziehung

$$\mathrm{Nu} = 5{,}2 + 0{,}025\, \mathrm{Pe}^{0{,}8}$$

ermittelt. L y o n erhielt an Hand von Messungen an Na-, K-Legierungen die Gleichung

$$\mathrm{Nu} = 7 + 0{,}025\, \mathrm{Pe}^{0{,}8} ,$$

dabei ist $\mathrm{Pe} = \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr}$. Die Verwendung eines gleichwertigen Durchmessers für Rohre von nicht kreisförmigem Querschnitt ist bei Kühlung mit flüssigen Metallen nicht mehr gerechtfertigt, da hier der Wärmetransport mehr durch Leitung als durch Konvektion vor sich geht. [5, 8]

engl.: free convection bzw. *forced convection*

franz.: convection naturelle bzw. *convection forcée*

Lit.: Gröber, Erk, Grigull, Wärmeübertragung, 3. Aufl., Springer, Berlin, 1955. – Liquid-Metals Handbook, 3. Ed. US. Government Printing Office, Washington, D.C. 25, 1955.

Konvektionsdiffusion, s. Diffusion, konvektive.

Konversion. Unter K. versteht man die Erzeugung neuer (andersartiger) spaltbarer Substanz beim Betrieb eines Reaktors, z. B. verbrennt man bei Uranreaktoren primär das Isotop ^{235}U. Ein Teil der Neutronen wird von ^{238}U eingefangen. Der dabei entstehende Kern ^{239}U geht durch zwei β-Zerfälle in Plutonium 239 über. ^{239}Pu ist spaltbar. Im Laufe der Zeit

geht der Reaktor allmählich von reinem ^{235}U-Brennstoff auf eine Brennstoffmischung von ^{235}U und ^{239}Pu über. Ein solcher Reaktor heißt Konverter. Das Verhältnis von erzeugter spaltbarer Substanz (^{239}Pu) zur abgebrannten spaltbaren Substanz (^{235}U) bezeichnet man als *Konversionsgrad. Der Begriff Konverter wird nicht immer einheitlich gebraucht, s. Brüter. [7]
engl.: conversion
franz.: conversion, régénération

Konversionselektron, aus der Atomhülle stammendes freies Elektron, auf das (von γ-Quanten) die Energie übertragen wurde, die bei der inneren Umwandlung (isomerer Übergang) eines angeregten Atomkerns in seinen isomeren Grundzustand frei wird. Die kinetische Energie des K.s ist gleich der Differenz zwischen der Umwandlungsenergie des Kerns und der Austrittsarbeit des Konversionselektrons aus seiner Elektronenschale. K.n sind deshalb monoenergetisch. Die Feinstruktur des K.n-Spektrums weist auf die Elektronenschalen hin, die an der Emission der K.n beteiligt sind. – Die Umwandlungsenergie des Kerns wird nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf Hüllenelektronen übertragen, welche der *Konversionsfaktor angibt. Findet kein Energieübertragungsakt statt, so wird die Umwandlungsenergie in Form eines Gammaquants abgestrahlt. Wegen der quantitativen Übereinstimmung der kinetischen Energie der K.n mit der um die Austrittsarbeit aus der jeweiligen Schale verminderten Gammaenergie beschreibt man die K.n-Emission oftmals als intraatomaren Photoeffekt. [16]
engl.: conversion electron
franz.: électron de conversion

Konversionselektronenstrahler sind solche radioaktiven Isotope, die von einem angeregten Zustand des Kerns in den Grundzustand übergehen und dabei mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit *Konversionselektronen emittieren. Der in der Atomhülle freigewordene Platz des Elektrons wird durch Umgebungselektronen unter Emission eines Röntgenquants aufgefüllt. Ist die Wahrscheinlichkeit des Übergangs der inneren Umwandlungsenergie auf Hüllenelektronen kleiner als 1 (*Konversionsfaktor < 1), so wird von

K.n auch Gammastrahlung, von der Größe der Umwandlungsenergie abgestrahlt, eine Tatsache, die die Deutung der Konversionselektronenemission als intraatomaren Photoeffekt zuläßt. Meist weisen K. auch Betastrahlung auf. Der Fall liegt hier meist so, daß der Betaübergang des Kerns Z zunächst zu einem metastabilen Zustand kurzer Halbwertszeit des Kerns $Z + 1$ führt, der dann unter Gammaabstrahlung und gegebenenfalls Konversionselektronenemission in einem isomeren Übergang sehr kurzer Halbwertszeit seinen Grundzustand erreicht. In der Isotopentechnik gebräuchliche K.:

Konversionselektronenstrahler

1. reine K. (Konversionsfaktor = 100 %) ohne Beta-Strahlung: Tc-97 (Konversionsenergie 95 keV) (Halbwertszeit 91 d).

2. K. mit Gamma-, jedoch ohne Beta-Strahlung:

Ba-133	ca. 80 keV	7,5 Jahre
Sr-87	39 keV	2,9 Stunden.

3. K. ohne Gamma- (K.-F. = 100 %), jedoch mit Beta-Strahlung:

Tb-161	49 keV	6,8 Tage.

4. K. mit Gamma- und Beta-Strahlung:

Au-199, Ce-141, Er-171, Hg-203, J-131, Dy-165, Mo-99, Pd-109, Pt-197, Re-186, Sm-153, Tm-170, Nd-147.

Anwendung in der Isotopentechnik: Die weiche Elektronenstrahlung der K. ist nur mit fensterlosen Meßsonden zu messen. Das erschwert ihren Gebrauch als Leitisotope und in der Radiochemie. Allerdings liegt ein Betalinienspektrum vor, das gelegentlich zur Identifizierung des Isotops z. B. bei der Neutronenaktivierungsanalyse dienen kann. Wegen der geringen Reichweite der Konversionselektronen sind K. mit einem schmalen Saum ionisierter Luft umgeben. Außer als sehr konstante Elektronenquellen geringer Teilchenenergie und geringsten mechanischen und elektrischen Aufwandes, sind K. auch als Röntgenstrahlquellen bemerkenswert. – Die Anwendungsbreite der K. ist zur Zeit noch gering. [16]
engl.: emitters of conversion electrons
franz.: émetteurs d'électrons de conversion

Konversionsfaktor, -rate. 1. Nicht empfehlenswerte Synomina zu Konversionsgrad, 2. s. Konversionselektron. [7]

Konversionsfaktor (innerer), Zahl kleiner oder gleich 1, welche angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die bei der inneren Umwandlung (isomerer Übergang) von Atomkernen freiwerdender Energie auf Hüllenelektronen des Atoms, die dann als Konversionselektronen das Atom verlassen, übertragen wird. Der K. wird oftmals in Prozenten angegeben.
Das Komplement des K.s zu 1 gibt die Wahrscheinlichkeit der Abstrahlung der Umwandlungsenergie als Gammastrahlung an. [16]
engl.: internal conversion coefficient
franz.: facteur de conversion

Konversionsgrad nennt man das Verhältnis der Anzahl E der in einem Reaktor durch Neutroneneinfang in brütbarem Material entstehenden neuen Spaltstoffatome zur Anzahl V der in der gleichen Zeit durch Spaltung und Neutroneneinfang verbrauchten Spaltstoffatome. Es ist also $C = E/V$.
Während der Einsatzdauer des Brennstoffes im Reaktor verändern sich die Brennstoffkonzentrationen und demzufolge der K. Eine charakteristische Zahl für einen Reaktor ist der anfängliche K., der unmittelbar nach Einsetzen des Brennstoffes in den Reaktor besteht. Im einfachsten Fall (nackter thermischer Graphitreaktor) ist

$$C = \frac{\Sigma_{238}^{a}}{\Sigma_{235}^{a}} + \varepsilon \cdot \eta_{253} (1 - p) \, e^{-B^2 \tau},$$

wobei $\eta_{235} = \nu \, \Sigma_{235}^{f} / \Sigma_{235}^{a}$. ε der Schnellspaltfaktor ist, p die Bremsnutzung, B die Flußwölbung und τ das Neutronenalter. S. a. Bezugsreaktor. [12]
engl.: conversion ratio
franz.: facteur de conversion, taux de conversion

Konverter in der Reaktortechnik, s. Brüter und Konversion.

Konzentrat ist das erste Fällprodukt *(„yellow cake")* nach der Laugung des Uranerzes. Das K. ent-

hält bereits einen gegenüber dem Ausgangserz erhöhten Gehalt an Uran. [2]
engl.: concentrate
franz.: produit concentré, minerai concentré

Konzentration, maximal zulässige (MZK), eines Radionukleids oder eines Gemisches verschiedener Radionukleide in Luft oder Wasser ist die maximal zulässige Aktivität dieser Isotope pro Volumeinheit ($\mu C/cm^3$), die auch bei einer langen Zufuhrdauer des damit verunreinigten Wassers bzw. der Luft zu einer für den Körper noch zulässigen Menge führt. Es ist

$$(MZK)_W = \frac{3{,}1 \cdot 10^{-4}\, q\, f_2}{T\, f_W (1 - e^{-0{,}693\, t/T})}$$

$$(MZK)_L = \frac{3{,}5 \cdot 10^{-8}\, q\, f_2}{T\, f_L (1 - e^{-0{,}693\, t/T})}$$

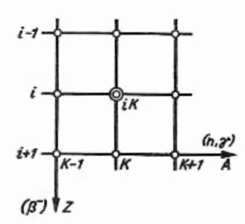
wobei $(MZK)_W$ die maximal zulässige Konzentration in Wasser ($\mu c/cm^3$), $(MZK)_L$ die maximal zulässige Konzentration in Luft ($\mu c/cm^3$), T die effektive Halbwertszeit in Tagen, f_W der zum kritischen Organ gelangende Teil der mit dem Wasser aufgenommenen Menge radioaktiver Substanz, f_L der zum kritischen Organ gelangender Teil der eingeatmeten Menge radioaktiver Substanz, $q\, f_2$ die Menge des Radio-Isotops in μc im kritischen Organ und t die Dauer der Zufuhr in Tagen. Die Gleichungen können immer dann angewendet werden, wenn die Ausscheidung der in einem Körper abgelagerten oder inkorporierten radioaktiven Substanz mehr oder weniger exponentiell erfolgt. [28]
engl.: maximal permissible concentration
franz.: concentration maximale tolerée

Konzentrationsänderungen im Reaktor sind eine Folge der Kernreaktionen. Man unterscheidet die *Vergiftung (vor allem durch Xe^{135}), d. h. den Auf- und Abbau von Spaltprodukten, die starke Neutronenabsorber sind, den *Abbrand des Spaltmaterials, die Produktion von neuem Spaltmaterial durch *Konversion oder *Brüten und die *Verschlackung. Auch bei der *Isotopenproduktion handelt es sich um K.
Die Konzentration $z_{ik}(\mathfrak{r}, t)$ eines bestimmten Isotops der Ordnungsnummer i und der Massenzahl k kann

Konzentrationsänderungen im Reaktor

sich u. a. ändern durch Betazerfall, Spaltung und Neutroneneinfang (s. Abb.). Die Änderung erfolgt nach dem Gesetz

$$\frac{\partial z_{ik}}{\partial t} + V(\mathfrak{r}, t) z_{ik} = G(\mathfrak{r}, t),$$



wenn die Reaktionsprodukte an den Ort ihrer Entstehung gebunden sind (Reaktor mit fixem Brennstoff). Die Verlustquote ist durch

$$V(\mathfrak{r}, t) = \lambda_{ik} + R^a_{ik}$$

gegeben, wobei λ_{ik} die Zerfallskonstante bedeutet und R^a_{ik} den Absorptionsverlust mißt. Die Gewinnquote beträgt

$$G(\mathfrak{r}, t) = \lambda_{i-1,k} \cdot z_{i-1,k} + \gamma_{ik} z_{mn} R^f_{mn} + \\ + z_{i,k-1} R^e_{i,k-1} + Q_{ik}.$$

Das erste Glied berücksichtigt den Zerfall des vorhergehenden Elements, das zweite die Spaltungen im Isotop I_{mn}, bei dem das Isotop I_{ik} mit der Ausbeute γ_{ik} entsteht, das dritte den Neutroneneinfang im vorhergehenden Isotop und schließlich Q_{ik} die äußere Zufuhr oder Entnahme des Isotops I_{ik}. Die Funktion

$$R^s_{ik}(\mathfrak{r}, t) = \int\limits_0^\infty \mathrm{d}E \int\limits_R \mathrm{d}\vec{\Omega} \cdot \sigma^s_{ik}(E) \cdot v \cdot N(\mathfrak{r}, t, E, \vec{\Omega})$$

bedeutet die Zahl der Kernprozesse vom Typus *s*, die pro Sekunde an einem Kern von I_{ik} vor sich gehen (σ mikroskopischer Wirkungsquerschnitt, v Neutronengeschwindigkeit, N Neutronendichte).

Die eingangs beschriebene Bilanzgleichung kann integriert werden und es ergibt sich die Konzentration

$$z_{ik}(\mathfrak{r}, t) = \left\{ z_{ik}(\mathfrak{r}, 0) + \int\limits_0^t G(\mathfrak{r}, t') \exp\left[\int\limits_0^{t'} V \,\mathrm{d}t''\right] \mathrm{d}t' \right\} \cdot \\ \cdot \exp\left[-\int\limits_0^t V \,\mathrm{d}t'\right].$$

Konzentrationsänderungen im Reaktor

Unter bestimmten Bedingungen kann sich nach hinreichend langer Zeit eine Gleichgewichtskonzentration (s. radioaktives Gleichgewicht)

$$z_{ik}(\mathfrak{r}) = G(\mathfrak{r}) / V(\mathfrak{r})$$

einstellen. Um die Konzentrationen einer Zerfalls- und Umwandlungsreihe zu ermitteln, löst man das obenstehende Integral für den ersten Stoff und setzt die Konzentration dieses Stoffs in das für den nächsten Stoff formulierte Integral ein, usf.

Die Änderung der Konzentrationen im Lauf des Reaktorbetriebes bewirkt eine Änderung der Querschnitte in der *Reaktorgleichung. Dies führt zu einer Änderung der Neutronenverteilung im Reaktor, die ihrerseits in die obigen Formeln eingeht. Das allgemeine Problem der K. führt also auf ein kompliziertes System von nichtlinearen Integro-Differentialgleichungen. Man kann dieses System näherungsweise dadurch lösen, daß man die Bestrahlungszeit in hinreichend kleine Zeitabschnitte unterteilt, so daß in jedem Zeitabschnitt die K. klein sind. Damit berechnet man die neue Flußverteilung, damit wiederum die K. im nächsten Zeitabschnitt, usf.

Das geschilderte Näherungsverfahren läuft darauf hinaus, daß Neutronendichte bzw. Fluß als separierbar aufgefaßt werden:

$$N(\mathfrak{r}, t, E, \vec{\Omega}) = T(t) \cdot n(\mathfrak{r}, E, \vec{\Omega})$$

bzw.

$$\Phi(\mathfrak{r}, t, E) = T(t) \cdot \varphi(\mathfrak{r}, E).$$

In der Regel wird es genügen, das *Zweigruppenverfahren zu verwenden. Man hat dann

$$V(\mathfrak{r}, t) = \lambda_{ik} + [\sigma_{ik}^{a(1)} \varphi_1 + \sigma_{ik}^{a(2)} \varphi_2]\, T(t),$$

$$G(\mathfrak{r}, t) = \lambda_{i-1,k} \cdot z_{i-1,k} + \gamma_{ik} z_{mn} [\sigma_{mn}^{f(1)} \varphi_1 + \sigma_{mn}^{f(2)} \varphi_2]\, T(t) + z_{i,k-1} [\sigma_{i,k-1}^{e(1)} \varphi_1 + \sigma_{i,k-1}^{e(2)} \varphi_2] \cdot T(t) + Q_{ik}$$

zu setzen. Die Indizes 1 und 2 weisen auf die schnelle bzw. thermische Gruppe hin.

Die K. bewirken Reaktivitätsänderungen. Diese ergeben sich nach der *Reaktor-Störungsrechnung, in-

dem man in den dort gegebenen Formeln, die Werte für $z_{ik}(\mathfrak{r}, t)$ einführt. [13]
engl.: concentration changes
franz.: changements de la concentration
Lit.: Reactor Handbook, Physics, AECD-3645, Verl. McGraw-Hill, New York, 1955. – H. Grümm, Der Stoffumsatz im Kernreaktor, Atomkernenergie 2, Heft 10, 1957.

Konzentrationseffekt, strahlenbiologischer. In der Strahlenbiologie versteht man unter K. die Erscheinung, daß viele biologische Objekte einen Anstieg der relativen biologischen Wirksamkeit zeigen, wenn man von der Anwendung ionisierender Korpuskeln mit geringer spezifischer Ionisation zur Anwendung von Korpuskeln mit hoher spezifischer Ionisation übergeht. S. a. Wirksamkeit, relative, biologische. [28]
engl.: concentration effect
franz.: effet de concentration

Konzentrationstrimmung, Steuerverfahren zur Grobeinstellung (*Trimmung) von größeren Reaktivitätsänderungen durch willkürliche Änderung der Lösungskonzentration eines Moderators, eines Kühlmittels oder einer Brennstofflösung. Häufig tritt durch Verdampfen und Dissoziation im Reaktor eine merkliche Salzanreicherung ein, so daß zur *Trimmung die gesteuerte Verdünnung der Lösung mit dem wiedergewonnenen (kondensierten, rekombinierten) Lösungsmittel ausreicht. [9]
engl.: concentration shimming
Lit.: s. Reaktorbeschreibungen in Peaceful Uses of Atomic Energy, Bd. 2 und 3, Genf 1955.

Koordinationszahl, in Molekül-Komplexen und vor allem in Kristallgittern die Anzahl gleichwertiger Nachbarn, von denen ein Atom oder Ion umgeben ist. So ist z. B. im Kristallgitter des Steinsalzes, NaCl (s. Abb. bei „Ionengitter"), die K. der nächsten ungleichartigen Ionen für jedes Ion (gleichgültig, ob Na oder Cl) 6, die K. der nächsten gleichartigen Ionen 12. Außer den K.n 6 und 12 kommen auch die K.n 4 und 8 häufig vor. [1]
engl.: coordination number
franz.: indice de coordination

Kopf, s. Rektifiziersäule.
engl.: top *franz.: sommet (de colonne)*

Korn, s. Kristallit.
engl.: grain
franz.: grain

Kornfeinung, s. Keimbildung.
engl.: fining of grain
franz.: affinage du grain

Korngewicht, s. Körnung.
engl.: particle weight
franz.: poids de grain

Korngrenze. Die Begrenzung eines *Kristallits in einem polykristallinen Werkstoff. Die K.n werden beim *Ätzen chemisch leichter angegriffen als die ungestörte Kornfläche, da die Kristallbereiche am Rand der Kristallite stark gestört sind. Häufig sammeln sich auch in den K.n Verunreinigungen an. [4]
engl.: grain boundary
franz.: limite de grains

Korngrößenverteilung, s. Körnung.
engl.: (particles) size distribution
franz.: répartition granulométrique

Kornseigerung. Konzentrationsunterschiede innerhalb eines Kristallits einer Legierung. Ein aus der Schmelze sich bildender Kristall hat (im Vergleich zur Konzentration der Schmelze) zunächst einen größeren Gehalt an derjenigen Komponente, welche die Liquidustemperatur (*Zustandsdiagramm) der Legierung erhöht. Beim weiteren Wachstum dieses Kristalls bilden sich sodann Kristallbereiche, welche ärmer an dieser Komponente sind. Werden diese Konzentrationsunterschiede nicht durch Diffusion während der Erstarrung ausgeglichen, so spricht man von K. Anschließendes Glühen kann zu einem nachträglichen Konzentrationsausgleich durch Diffusion führen. [4]
engl.: coring
franz.: segrégation

Körnung. Die *Zerkleinerung, eines der wichtigsten vorbereitenden *Grundverfahren für die *Aufbereitung von Rohstoffen, führt i. a. nicht zu einem monodispersen Kornhaufwerk, sondern zu verschiedenen Korngrößen. Die Kenntnis der Korngröße und der Korngrößenverteilung in einem solchen, durch Zerkleinerung gewonnenen Haufwerk ist für die Durchfüh-

Körnung rung der nachfolgenden Verarbeitungsverfahren häufig von ausschlaggebender Bedeutung. Bei Uranerz genügt für die nachfolgende Laugung häufig schon eine Zerkleinerung durch Brechen auf 10 bis 15 mm Korngröße. Bei primären Erzen muß wesentlich feiner, bis zu etwa 0,1 mm Korngröße gemahlen werden. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Probenahme, die zur Bestimmung des tatsächlichen Urangehaltes und damit des Preises unerläßlich ist: Je gröber nämlich das Korn ist, desto größer muß die Probemenge sein. Sie schwankt, bezogen auf 1000 t ein und desselben Erzes, zwischen 0,1 und 1000 kg (!), wenn die Korngröße zwischen 0,1 und 10 mm liegt. Die Klärung der tatsächlich erforderlichen Korngröße ist also außerordentlich wichtig. Für chemische Prozesse ist die spezifische Oberflächenentfaltung beim Zerkleinern von Bedeutung, die ihrerseits ebenfalls unmittelbar mit der Korngröße und der Kornform zusammenhängt. Die Er-

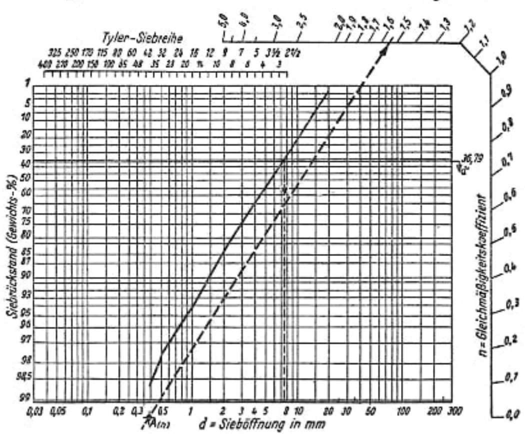


Abb. 1. Körnungsnetz mit Siebrückstandskurve nach Rosin-Rammler

mittlung der Korngrößenverteilung erfolgt i. a. durch die Siebanalyse, die in einfachster Form als Tabelle niedergelegt wird, indem der prozentuale Anteil jeder Korngröße (meist durch Wägung als K o r n g e w i c h t bestimmt!) als S i e b r ü c k s t a n d R in % zu dem

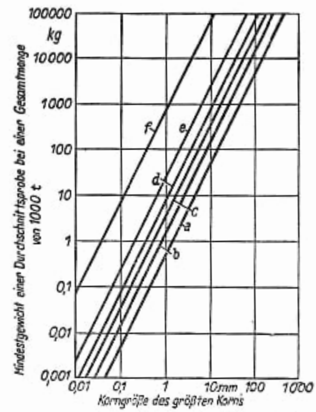


Abb. 2. Abhängigkeit der Probemenge vom Korndurchmesser nach Taggart. Die Geraden geben fortschreitend von *a* nach *f* die Zunahme der Ungleichmäßigkeit der Metallverteilung im Erz an.

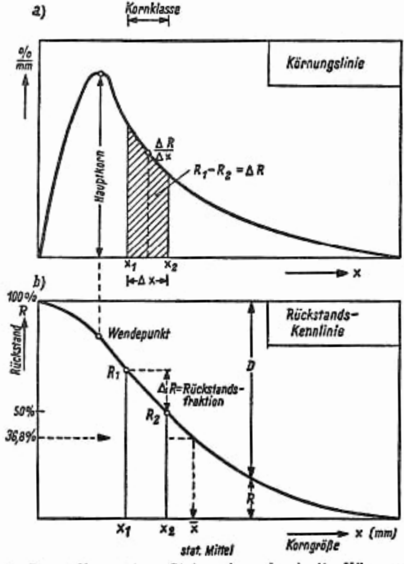


Abb. 3. Darstellung einer Siebanalyse durch die Körnungslinie (oben) und die Rückstandskennlinie (unten).

jeweiligen Sieb angegeben wird. Besser ist jedoch die Angabe der „Siebrückstandskurve" oder „Rückstandskennlinie" im „Körnungsnetz" nach Rosin, Rammler und Bennett, in welchen der Siebrückstand R auf der doppeltlogarithmisch geteilten Ordinate, die Korngröße d auf der einfach logarithmisch geteilten Abszisse aufgetragen werden und meist eine gerade oder nahezu eine gerade Linie ist, die sich durch

$$R = 100 \cdot e^{-(d/d')^n}$$

darstellen läßt. Damit ist aber die Kornverteilung durch nur zwei Kenngrößen gekennzeichnet, nämlich das sog. „statistische Kornmittel" d' für $R = 100/e = 36{,}8\,\%$ und den „Gleichmäßigkeitskoeffizienten" n. Je steiler die Kenngerade, desto größer n und damit desto gleichkörniger das Zerkleinerungsgut mit der Mittelfeinheit d'. Meist ist $0{,}6 < n < 1{,}6$. Durch Einführung eines Formfaktors (Heywood-Faktor) läßt sich aus der Korngrößenverteilung für ein gegebenes Material die effektive Oberfläche als spezifische Oberfläche O_k' (m²/kg) ermitteln. [2]

engl.: particle size distribution

franz.: calibrage, granulométrie

Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. – S. Kießkalt, Verfahrenstechnik, München, 1951. – DIN 4190.

Kornwachstum. Die Kristallisationsgeschwindigkeit ist eine stark orientierungsabhängige Größe. Bei freiem K. bilden sich durch Ebenen begrenzte Kristalle, deren äußere Symmetrie die Symmetrie der *Elementarzelle wiedergibt. – Das K. in einem polykristallinen Material ist von der gegenseitigen Orientierung der benachbarten Körner abhängig. Bei genügend hoher Temperatur wachsen die Körner mit günstiger Orientierung und geringer Oberflächenenergie auf Kosten der anderen und führen zu einer Gefügevergröberung. [4]

engl.: growth of crystal franz.: croissance de grains

Körperschichtaufnahmen. Die Schichtbildaufnahmetechnik (auch Tomographie, Planigraphie, Stratigra-

phie genannt) gestattet es, bei Röntgen-Aufnahmen nur eine einzige Körperschicht zur Darstellung zu bringen, deren Tiefe und Dicke nach Belieben einzustellen ist. Alle anderen Körperschichten werden dabei unscharf und unterbelichtet dargestellt.

Körperschichtaufnahmen

Man unterscheidet bei den Schichtgeräten zwei Hauptgruppen:

1. Schichten parallel zur Körperachse durch den „Tomograph“, den „Vertikal- und Universalplanigraph“, sowie verschiedene Schichtzusatzgeräte zu Standarddiagnostikgeräten;

2. Schichten senkrecht zur Körperachse, wofür es in Deutschland bis jetzt nur ein Gerät, den „Transversal-Planigraphen“ (SRW) gibt.

Bei 1. werden Röhre und Film während der Aufnahme in bestimmter Weise gegensinnig bewegt. Ihre Bewegung relativ zum ruhenden Objekt ist so, daß nur die Objektpunkte einer Körperschicht in jedem Augenblick auf die gleiche Stelle des Filmes abgebildet werden. Dagegen verändern die den übrigen Körperschichten zugeordneten Bildpunkte während der Bewegung dauernd ihre Lage auf dem Film. Dadurch werden die Konturen verwischt und ihre Schattendichte beträchtlich herabgesetzt.

Der Bewegungsmechanismus bei 2. ist ein völlig anderer. Die Röhre steht jetzt fest, dafür dreht sich der Patient bei der Aufnahme auf einer Drehscheibe in vertikaler Stellung (stehend oder sitzend) bei jeder Aufnahme einmal ganz um seine Längsachse. Gleichzeitig und gleichsinnig dreht sich auch die Kassette einmal um ihren Mittelpunkt. Sie liegt von der Röhre aus gesehen hinter dem Patienten in waagerechter oder geneigter Stellung, je nach der darzustellenden Ebene. Scharf dargestellt wird die parallel zur Kassettenebene verlaufende Körperschicht, die den Schnittpunkt zwischen Körperachse und der Verbindungslinie Fokus-Kassettenmitte enthält. Der Verwischungsgrad aller Objektelemente außerhalb dieser Körperschicht ist von dem Einfallswinkel zwischen Kassettenebene und der Verbindungslinie Fokus-Kassettenmitte abhängig. Je kleiner er ist, um so größer ist der Verwischungsgrad. Je weiter die Objektpunkte von der Schnittebene ent-

fernt sind, desto kleiner ist ihre Schattendichte und desto größer sind die kreisförmig verwischt dargestellten Objektelemente. [28]
engl.: body section radiography
franz.: planigraphie

Korpuskularemission, Sekundärstrahlung (Elektronen), die auftritt, wenn primäre Strahlung (Röntgen- und γ-Strahlung) auf Materie trifft. [17]
engl.: corpuscular emission
franz.: émission corpusculaire

Korrosion. Chemischer oder elektrochemischer Angriff eines flüssigen oder gasförmigen Mediums auf ein Metall. Bildet das Korrosionsprodukt keine festhaftende, dichte Schutzschicht auf dem Metall, welche vor weiterem Angriff schützt, so wird das Metall schließlich vollkommen zerstört. Wichtige Korrosionsarten sind: Der gleichmäßige Angriff (auch Löslichkeit genannt), der örtliche Angriff (*Lochfraß), die interkristalline Korrosion (Korngrenzenkorrosion), die vornehmlich entlang den Korngrenzen in das Innere des Metalls vordringt, die transkristalline K., die *Spannungskorrosion, die *Kontaktkorrosion und die *Ermüdungskorrosion.
Als relativ korrosionsbeständige Materialien haben sich beim Reaktor Monel, Permonel, Zirkon, Edelstahl mit hohem Chrom-Nickel-Gehalt (durch Columbium oder Niob stabilisiert), Titan und *Carpenter 20 bewährt.
K. metallischer Werkstoffe einschließlich Edelstahl wird durch die Anwesenheit von Halogen-Ionen sowie durch sechswertige Chrom-Ionen katalytisch beschleunigt. [4, 22]
engl.: corrosion
franz.: corrosion
Lit.: F. Tödt, Korrosion und Korrosionsschutz, de Gruyter, Berlin, 1955.

Kosmotron, eines der größten z. Z. in Betrieb befindlichen Protonen-*Synchrotrons. Das K. steht am Brookhaven-Nationallaboratorium in Upton, N. Y., hat rund 30 m Durchmesser, ein Magnetgewicht von 1700 t und liefert Protonenstrahlen von 3000 MeV. [1]
engl.: cosmotron *franz.: cosmotron*

Kraftwerksregelung, s. Kernkraftwerksregelung.

Kraftwerkswirkungsgrad, s. Leistungsreaktoranlage.

Krebsentstehung (C a r c i n o g e n e s e). Bei chronischer Strahlenschädigung von Körpergeweben entsteht häufig, insbesondere bei langdauernder Einwirkung kleiner Strahlendosen am Ort der Strahleneinwirkung eine bösartige Geschwulst („Strahlenkrebs"). Als Berufsschaden tritt der Strahlenkrebs insbesondere bei Radiologen, Radiophysikern, Bergleuten im Uranbergbau, Leuchtzifferblattmalern etc. auf. Die Latenzzeiten bis zum Erkennbarwerden der Geschwulstbildung betragen beim Menschen meist 10–30 Jahre. Die durch künstlich radioaktive Isotope ausgelösten Geschwulstbildungen finden sich vor allem an den Stellen, welche auf Grund der Applikationsart und der Verteilung des Radio-Isotops im Körper die stärkste Strahlenbelastung erfahren. [28]
engl.: carcinogenity
franz.: cancérisation (par irradiation)

Kreislauf. Man unterscheidet zwischen offenem und geschlossenem K. sowohl hinsichtlich des Reaktorkühlmittels (*Kühlmittelkreisläufe) als auch des am thermodynamischen K. beteiligten Arbeitsmittels, außerdem zwischen erzwungenem und freiem Umlauf.
Der K. ist o f f e n, wenn das Kühlmittel bzw. das Arbeitsmedium (Gas oder Flüssigkeit) von einem beliebig großen Reservoir angesaugt und nach Durchströmung des Reaktors wieder an dieses abgegeben wird. Meist werden Außenluft, Flüsse oder Seen als dieses Reservoir benutzt. Offene K.e werden bei Reaktoren ausschließlich für die Kühlung von Versuchs- und Forschungsreaktoren und Plutoniumgeneratoren angewandt, nicht bei Leistungsreaktoren. Beispiele für Luftkühlung sind die Graphitreaktoren Brookhaven, X-10 (Oak Ridge) und Bepo, der belgische Forschungsreaktor BR 1, die Plutoniumproduktionsreaktoren in Windscale und Marcoule; für Flußwasserkühlung die Hanford-Reaktoren.
Der K. ist g e s c h l o s s e n, wenn eine begrenzte Menge des Kühlmittels in einer Ringleitung unter Zwischenschaltung eines Wärmetauschers kontinuier-

lich durch den Reaktor geführt wird. Bei der Mehrzahl der Reaktoren wird diese Kühlung angewandt. Beispiele dafür sind unter den Forschungsreaktoren insbesondere die Wasserbecken- und Wasserkesselreaktoren (H_2O- oder D_2O-Kühlung) sowie die Reaktoren vom Typ CP 5, DIDO, NRX, in Deutschland die Reaktoren in Karlsruhe, München, Frankfurt. CO_2-gekühlte Forschungsreaktoren gibt es im französischen Kernforschungszentrum Saclay. Nach diesem Prinzip gekühlte Leistungsreaktoren sind der CO_2-gekühlte Calder-Hall-Reaktor oder der H_2O-gekühlte amerikanische Druckwasserreaktor in Shippingport (PWR).

Der K. ist erzwungen, wenn das Kühlmittel durch Pumpen oder ein Gebläse in Umlauf versetzt wird. Er heißt frei, wenn die Strömung durch Dichteunterschiede aufrechterhalten wird, die durch den Temperaturunterschied bei Eintritt und Ausfluß des Kühlmittels entstehen.

Wenn das Reaktorkühlmittel gleichzeitig als Arbeitsmittel in Dampf- bzw. Gasturbinen verwendet wird und die im Reaktor erzeugte Radioaktivität in Kauf genommen werden kann, genügt ein einziger K. (Siedewasserreaktor, Gasturbinenreaktor). Demgegenüber benötigen flüssigmetall- oder druckwassergekühlte Reaktoren mindestens zwei K.e.

Bei Flüssigmetall-Reaktoren wird wegen der Radioaktivität des Primär-K.s meist noch ein Zwischen-K. mit nicht radioaktiven flüssigem Metall zwischengeschaltet, um den Dampferzeuger überwachen zu können.

Bei der Entwicklung von Reaktoren sind in der Versuchstechnik K.e erforderlich, um die wirklichen Verhältnisse bezüglich Korrosion und Wärmeübergang untersuchen zu können. Für genaue Messungen werden Versuchs-K.e in das Strahlungsfeld vorhandener Reaktoren eingebaut; sie müssen dann den entsprechenden Sicherheitsbedingungen genügen. [7, 8]

engl.: loop, circuit

franz.: cycle

Kreislaufüberwachung, wesentlicher Zweig der Reaktorüberwachung zur Sicherstellung der notwendigen Zustandsbedingungen in den Kühl- und Spülkreis-

läufen. Die K. erstreckt sich a) auf die aus betriebstechnischen Gründen erforderlichen Bedingungen, z. B. Dampfdruck und Dampfstrom, b) auf die aus Sicherheitsgründen wichtigen Eigenschaften, z. B. Lösungs- oder Gaszusammensetzung, Radioaktivität, und c) auf den Bereitschaftszustand von Reserveanlagen und Schutzeinrichtungen, z. B. Ersatzkreisläufe, Notkühlanlagen, Absperreinrichtungen und Auffangbehälter. Alle drei K.n stehen in engem Zusammenhang mit den übergeordneten Steuer- und Sicherheitssystemen. S. a. Überwachungseinrichtungen, Sicherheitsprobleme. [9]
engl.: circuit survey
franz.: surveillage de la circuit

Kreisprozeß, s. thermischer Wirkungsgrad.
engl.: thermodynamic cycle
franz.: cycle thermodynamique

Kriechen. Eine langsame und sich über einen längeren Zeitraum erstreckende plastische Verformung unter dem Einfluß einer ruhenden Belastung. Nach einer anfänglich großen Verformungsgeschwindigkeit im Stadium des primären K.s setzt ein langsameres sekundäres K. ein, das (je nach Temperatur und Belastung) schließlich zum Stillstand kommt oder aber in ein zum Bruch führendes, schnelleres tertiäres K. übergeht. Bei höher schmelzenden Metallen (z. B. bei Eisen, Stahl, Kupfer) beobachtet man das K. erst bei höheren Temperaturen, bei niedrigschmelzenden Metallen (z. B. bei Zink) schon bei Raumtemperatur. Festigkeitskennwerte unter Berücksichtigung des Kriechverhaltens werden in *Standversuchen gewonnen. [4]
engl.: creep
franz.: fluage

Lit.: G. Masing, Lehrbuch d. allg. Metallkunde, Springer, Berlin, 1950.

Kriechgeschwindigkeitsgrenze, s. Standversuch.
engl.: creep rate limit
franz.: vitesse limite de fluage

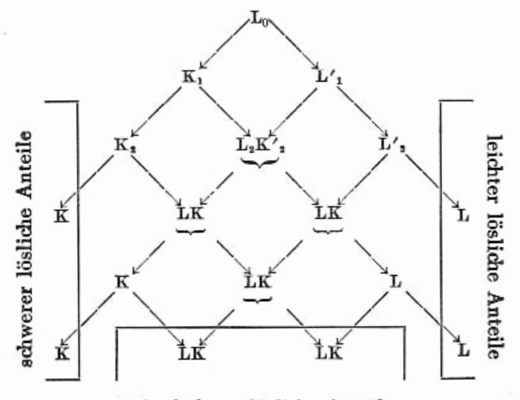
Kristall-Dosimeter dient zur Messung der Dosisleistung aller Arten von Strahlung. Die Strahlung erzeugt in einem Fluoreszenzmaterial Leuchten. In optischem Kontakt mit der Fluoreszenzmasse befindet sich eine Widerstandsphotozelle (z. B. ein Cadmiumsulfidkri-

stall). Der Widerstand der Zelle wird gemessen. Er ist ein Maß für die einfallende Strahlung. – Vorzug des Gerätes: die für Ionisationskammern und Photovervielfacher notwendige hohe Spannung wird vermieden, da Widerstandsmessung bei sehr kleiner Spannung möglich. Nachteil: Empfindlichkeit und Genauigkeit gering. [6]
engl.: crystal dosemeter
franz.: dosimètre à cristal

Kristalleffekte. Als K. bezeichnet man die Abhängigkeit des makroskopischen Wirkungsquerschnitts von der Kristallstruktur des Materials, z. B. Variation des makroskopischen Querschnitts bei Umkristallisationen (Voluminderungen, Änderung der Bindung). [7]
engl.: crystal effects
franz.: effets de cristal

Kristallgitter, s. Gitter.

Kristallisationsschema. Ein zur Trennung ähnlicher Verbindungen mit geringen Löslichkeitsunterschieden, z. B. den Doppelsalzen der Seltenen Erden, angewandtes Schema der fraktionierten Kristallisation. Eine Ausgangslösung (L_0) wird teilweise zur Kristallisation gebracht und die erhaltenen Kristalle (K_1) nach erneutem Lösen wieder fraktioniert. Im Filtrat (L_2) dieser zweiten Kristallisation werden die aus der



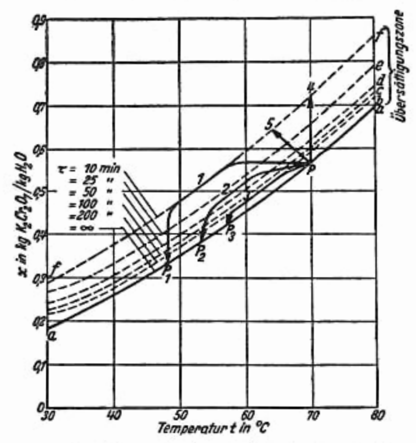
ersten Mutterlauge (L_1) weiter ausgefallenen Kristalle (K_2') gelöst usw. [3]

engl.: cristallisation scheme

franz.: schéma de cristallisation

Lit.: A. F. Hollemann u. E. Wiberg, Anorganische Chemie, de Gruyter, Berlin, 1955.

Kristallisieren dient der Trennung einer Lösung in ihre flüssigen und festen Komponenten, meist mit dem Ziel, den oder die Feststoffe in größtmöglicher Reinheit (Auskristallisieren) zu gewinnen. Dabei steht in der Industrie die Gewinnung reiner Stoffe aus wässerigen Lösungen im Vordergrund. Die zum K. angewendeten Apparate (s. Apparatebau) arbeiten meist absatzweise, also mit einzelnen Füllungen, aber auch Anlagen zum stetigen K. sind entwickelt worden. Älteste Bauform ist die Kristallisierwanne. Die Verdampfungskristallisatoren (s. Verdampfung) arbeiten mit Wärmezufuhr. Eine besondere Art der Anlage sind die Vakuumkristallisatoren. Sie arbeiten mit adiabatischer Verdampfung, d. h. daß die Verdampfungswärme aus der Flüssigkeit selbst heraus bestritten wird, also keine äußere Wärmezufuhr erforderlich ist. Sie arbeiten demnach wie Verdamp-



Übersättigungsfeld einer wäßrigen Kalium-Bichromat-Lösung nach Berl. x Menge gelöster Substanz in kg, a Gleichgewichtskurve, b bis f Übersättigungskurven für konstante Zeiten.

fungsanlagen mit Vakuumpumpen (Dampfstrahlpumpen) und Brüdenverdichtung. Eine Ausweitung der Kristallisiertechnik sind das Ausfrierverfahren und die Gefriertrocknung. [2]
engl.: crystallization *franz.: cristallisation*
Lit.: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., München-Berlin, 1951, Bd. 1: Chemischer Apparatebau und Verfahrenstechnik. (Dort weitere Literaturhinweise.) – G. Matz, Die Kristallisation in der Verfahrenstechnik, Berlin, 1954.

Kristallit (Korn). Kleiner Einkristall in einem polykristallinen Werkstoff. Infolge der gegenseitigen Wachstumsbehinderung bei der Entstehung der K.e haben dieselben eine unregelmäßige Begrenzung (*Korngrenze). Die Größe der aus einer Schmelze entstehenden K.e hängt von den Abkühlungsbedingungen und von der Anwesenheit von Keimen ab. Außerdem kann die Größe der K.e in einem Gefüge (Korngröße) durch Kaltverformung und Wärmebehandlung in weiten Grenzen variiert werden. [4]
engl.: grain, crystallite
franz.: grain cristallin, cristallite

Kristallphosphore, s. Phosphore.

Kristallschwingungen. Jedes Kristallgitter kann als System von Massenpunkten aufgefaßt werden und ist als solches, entsprechend seiner großen Zahl von Freiheitsgraden, einer großen Zahl v. Eigenschw. fähig. Alle inneren Bewegungen des Kristallgitters können als Überlagerung dieser Eigenschw. aufgefaßt werden.
Die K. umfassen alles von den langsamen Schallwellen über den Ultraschall (z. B. beim Schwingquarz), bei welchen nur eine oder wenige der langwelligsten Eigenschwingungen angeregt sind, bis zur unregelmäßigen Wärmebewegung der den Kristall aufbauenden Atome oder Ionen, welche als Überlagerung sehr vieler kurzwelliger Eigenschwingungen, besser aller Eigenschwingungen überhaupt betrachtet werden muß. Die K. sind daher grundlegend wichtig für die Theorie des Wärmeinhalts und der spezifischen Wärme eines Kristalls, welche in fortschreitender Näherung für das Frequenz-Spektrum der Eigenschwingungen von Einstein, Debye und Born aufgestellt wurde. [1]
engl.: crystal oscillations
franz.: oscillations réticulaires, agitation thermique

Kristallstruktur. Nach ihrer Symmetrie werden die Kristalle in sechs Systeme unterteilt. Das kleinste Volumelement, das durch identische Wiederholung den gesamten Kristall aufbaut, ist die *Elementarzelle mit den Seitenlängen a, b und c, welche untereinander die Winkel α, β und γ bilden. Die Kristallsysteme sind:

1. Triklines System
   $$a \neq b \neq c; \quad \alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$$
2. Monoklines System
   $$a \neq b \neq c; \quad \alpha = 90^\circ, \beta, \gamma \neq 90^\circ$$
3. Rhombisches System
   $$a \neq b \neq c; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$
4. Tetragonales System
   $$a = b \neq c; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$
5. Kubisches System
   $$a = b = c; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$
6. Hexagonales System
   $$a = b \neq c; \quad \alpha = 120^\circ, \beta = \gamma = 90^\circ$$

Die Metalle kristallisieren bevorzugt in den beiden letztgenannten Systemen, welche die höchste Symmetrie zeigen. Eine Anzahl von Metallen (z. B. *Eisen, *Uran, *Zinn) haben in verschiedenen Temperaturbereichen verschiedene K. – Die K. kann mit röntgenographischen Methoden bestimmt werden. [4]
engl.: crystalline structure
franz.: structure cristalline
Lit.: H. Jagodzinski, Kristallographie, Handbuch der Physik, Bd. VII/1, Springer, Berlin, 1955.

Kristallzähler. Gewisse Kristalle, vor allem Diamant, ergeben bei Bestrahlung mit α-Strahlen für jedes auftreffende α-Teilchen so viele freigesetzte Elektronen, daß die dadurch entstehende momentane Leitfähigkeit ausreicht, aus einer angelegten Spannung einen registrierbaren Stromimpuls zu erhalten. So kann ein derartiger Diamant als K. die auftreffenden α-Teilchen zählen. Der K. ist nicht zu verwechseln mit dem *Szintillationszähler, der zwar auch meist einen Kristall benützt, aber nicht mit dessen Leitfähigkeit, son-

dern mit den von den Teilchen ausgelösten Lichtblitzen arbeitet. [1]

engl.: crystal counter *franz.: compteur à cristal*

kritisch. Ein Reaktor heißt k., wenn ebenso viele Neutronen entstehen wie absorbiert werden und durch Begrenzung und Kanäle abdiffundieren. In diesem Falle kommt die Kettenreaktion weder zum Erliegen, noch führt sie zu einer Vergrößerung der Neutronendichte, d. h. der effektive Vermehrungsfaktor (erweiterte Eingruppentheorie)

$$k_{\text{eff}} \equiv \frac{k \cdot e^{-B^2 \tau}}{1 + L^2 B^2} = 1$$

(k Vermehrungsfaktor, B Buckling, L Diffusionslänge, τ Fermi-Alter). Der Faktor $e^{-B^2 \tau}$ gibt den Bruchteil der schnellen, der Faktor $(1 + L^2 B^2)$ den Bruchteil der thermischen Neutronen an, die nicht abdiffundieren. [7]

engl.: critical *franz.: critique*

kritische Anordnung, analog zu *kritisches Experiment.

engl.: critical assembly *franz.: arrangement critique*

kritische Gleichung. Die k. G. gibt die Verknüpfung von Materialdaten mit den Abmessungen an, bei denen im Reaktor eine sich selbst unterhaltende Kettenreaktion gerade eben abläuft, d. h. bei denen der Reaktor kritisch ist. Diesen Sachverhalt kann man so formulieren, daß die materiell bedingte *Flußwölbung gleich der geometrischen Flußwölbung ist, also

$$B_m = B_g \,. \tag{1}$$

Eine derartige Formulierung ist allerdings nur sinnvoll und üblich dort, wo man B_g und B_m unabhängig voneinander berechnet. Das ist bei der *Eingruppentheorie des nackten Reaktors möglich [s. Flußwölbung, Gl. (1) und (2)]. Im Sprachgebrauch heißt jede Gleichung k. G., bei der man sich die Gleichsetzung von B_g und B_m vollzogen denkt. Im einfachsten Fall wird

$$\frac{k_\infty \cdot e^{-B_g^2 \tau}}{1 + L^2 B_g^2} = 1 \tag{2 a}$$

oder – beim großen Reaktor mit $B_g^2 \ll 1$ –

$$\frac{k_\infty}{1 + B_g^2 (L^2 + \tau)} = 1 \tag{2 b}$$

k. G. genannt (k_∞ Vermehrungsfaktor, L Diffusionslänge, τ Fermi - Alter).

kritische Gleichung

Schon bei der Eingruppentheorie des Reaktors mit Reflektor ist die Berechnung vom B_g schwieriger als die vom B_m. Die materiell bedingte Flußwölbung wird aus der Gleichung

$$\frac{k_\infty}{1 + L^2 B^2} = 1 \tag{3}$$

oder auch – in nachträglicher Verbesserung der Theorie – aus (2 b) berechnet. Den Zahlwert $B^2 = B_m^2$ setzt man in die Differentialgleichung für den Fluß Φ ein:

$$\Delta\Phi + B_m^2 \, \Phi = 0 \, . \tag{4}$$

Diese wird dadurch nicht mehr eine Eigenwertgleichung für die Bestimmung von B, sondern für die Bestimmung der Abmessungen. Letztere folgen durch den Anschluß an den Fluß im Reflektor. Die Forderung der Lösbarkeit liefert eine transzendente Gleichung für die Abmessungen der inneren Anordnung. Daher ist die Lösbarkeitsbedingung die k. G.

Komplizierter werden die Verhältnisse bei einer Zweigruppentheorie, bei der aus

$$\frac{k_\infty}{(1 + L^2 B^2)\,(1 + \tau B^2)} = 1 \tag{5}$$

zwei Werte für die materielle Flußwölbung B^2 folgen, von denen einer negativ ist ($B_1{}^2 = \mu^2; B_2{}^2 = -\nu^2$). Man muß beide Wurzeln in die Flußgleichung (4) einsetzen und erhält so zwei Gleichungen für den Fluß im Reaktorinneren:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi + \mu^2 \, \Phi &= 0 \, , \\ \Delta\Phi - \nu^2 \, \Phi &= 0 \, . \end{aligned} \tag{6}$$

Der thermische und der schnelle Fluß in der inneren Anordnung sind dann Überlagerungen der Lösungen von (6):

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= A \, \Phi_\nu + C \cdot \Phi_\mu \, , \\ \Phi_2 &= D \, \Phi_\nu + E \cdot \Phi_\mu \, . \end{aligned} \tag{7}$$

A, C, D, E sind Konstanten. Diese Lösungen sind an die Lösungen im Reflektor anzuschließen und hieraus

die kritischen Abmessungen des Innenraums (bei vorgegebener Reflektordicke) auszurechnen. Es existiert wieder eine Lösbarkeitsbedingung, die k. G. heißt.

An Stelle k. G. sagt man mitunter auch charakteristische Gleichung. [7]

engl.: critical equation *franz.: équation critique*

Lit.: R. L. Murray, Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1957. – W. Riezler u. W. Walcher, Kerntechnik, B. G. Teubner, Stuttgart, 1958. – F. Cap, Physik und Technik der Atomreaktoren, Springer, Wien, 1957. – S. Glasstone u. M. C. Edlund, Elements of Nuclear Reactor Theory, van Nostrand, New York, 1955.

kritische Gleichung, Momentform. In der *Reaktorgleichung nach Weinberg nimmt die kritische Gleichung die Gestalt

$$\frac{k_\infty \overline{P}_\infty (B_n{}^2)}{p(1 + L^2 B^2)} = 1$$

an, wobei $\overline{P}_\infty (B^2)$ die Fourier-Transformierte des unendlichen *Bremskerns P_∞ darstellt. Man definiert als $2\,n$-tes Moment des Bremslängenquadrats die (experimentell bestimmbare) Größe

$$\overline{r^{2n}} = \int_0^\infty r^{2n} P_\infty r^2 \,\mathrm{d}r \Big/ \int_0^\infty P_\infty r^2 \,\mathrm{d}r \,.$$

Damit kann die k. G. aufgestellt werden:

$$\frac{k_\infty}{1 + L^2 B^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2\,n + 1)\,!} B^{2n} \overline{r^{2n}} = 1 \,.$$

Ist der Reaktor groß gegenüber $\overline{r^2}$, so ist der Summenausdruck $\approx 1 - (1/6) B^2 \overline{r^2}$ und die k. G. lautet

$$\frac{k_\infty}{1 + L^2 B^2} \left(1 - \frac{1}{6} B^2 \overline{r^2}\right) = 1 \,.$$

Ist weiterhin $B^2 \overline{r^2}/6$ klein gegen 1, so erhält man die bekannte Beziehung

$$\frac{k_\infty}{1 + B^2 (L^2 + (1/6) \overline{r^2})} = \frac{k_\infty}{1 + M^2 B^2} = 1 \,,$$

wobei M die Wanderlänge bedeutet. [13]

engl.: moment form of the critical equation

franz.: équation critique sous la forme du moment

Lit.: S. Glasstone and M. C. Edlund, The Elements of the Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand, New York, 1952, Kap. XII.

kritische Größe, s. Größe, kritische.

kritische Masse, s. Masse, kritische.

kritischer Radius ist derjenige Radius einer kugelförmigen Spaltzone, bei der die Anordnung kritisch ist. Dabei kann die Spaltzone von einem Reflektor umgeben oder nackt sein. Bei Angabe eines k. R. muß daher sowohl Struktur, Material und Temperatur der Spaltzone wie deren Umgebung bekannt sein. [7]
engl.: critical radius *franz.: rayon critique*

kritisches Experiment. Wenn spaltbares Material und Moderator zusammengesetzt werden, so daß die Anordnung schließlich kritisch ist, spricht man von einem k. E. Zur sicheren Durchführung ist die Verwendung einer Neutronenquelle unerläßlich. Der Neutronenfluß bleibt grundsätzlich sehr niedrig, so daß Kühlung nicht notwendig ist und eine Vergiftung durch Spaltprodukte sich nicht auswirkt. Man will auf diese Weise Rechnungen über die Anordnung, die möglicherweise Grundlage eines neuen Reaktors werden könnte, kontrollieren bzw. normieren. Insbesondere untersucht man die kritische Größe, Temperaturkoeffizienten der Reaktivität, Betriebsverhalten einschließlich Steuerung. [7]
engl.: critical experiment
franz.: expérience critique
Lit.: s. kritische Gleichung.

kritisches Organ, s. Organ, kritisches.

Krypton 85, ein sowohl durch Neutronenbestrahlung des Edelgases Krypton als auch bei der Kernspaltung entstehender Beta- und Gammastrahler. Als Isotop eines Edelgases eignet es sich für radiometrische Leckmessungen und Adsorptionsuntersuchungen an oberflächenreichen Pulvern. Halbwertszeit 10,6 Jahre. Ein angeregtes ^{85}Kr geht mit 4,4 Stunden Halbwertszeit teils unter Emission von Gammastrahlung und von Konversionselektronen in den Grundzustand, teils unter Gamma- und Betaemission in das Rubidiumisotop 85 über. [16]
engl.: krypton 85 *franz.: krypton 85*

Kryptoskop, lichtdichter pyramidenförmiger Kasten, dessen Basisfläche durch einen Leuchtschirm mit Bleiglasscheibe gebildet wird und dessen gegenüberliegende Fläche, ebenfalls aus Strahlenschutzstoff, eine Öffnung hat, die sich den Augen so anpaßt, daß kein

Tageslicht eindringen kann. Das K. wird zu Durchleuchtungskontrollen verwendet, wenn eine Verdunkelung oder ein Transport des Patienten in den Röntgen-Raum nicht möglich ist, z. B. bei Operationen und am Krankenbett. [28]
engl.: cryptoscope *franz.: cryptoscope*

K-Schale, s. Atombau.

kubisch, s. Kristallstruktur.
engl.: cubic *franz.: cubique*

kubisch flächenzentriert. Eine *Kristallstruktur des kubischen Systems, deren *Elementarzelle würfelförmig aus acht Eckatomen und sechs jeweils in der Mitte der Würfelflächen befindlichen Atome aufgebaut ist. Da jedes Eckatom zugleich acht, jedes flächenzentrierende Atom zugleich zwei Elementarzellen angehört, enthält die k. fl.e Elementarzelle vier Atome. Diese Struktur ist eine dichteste Kugelpackung. Zahlreiche Metalle (z. B. Ag, Al, Au, Ca, Ce, Co, Cu, Gamma-Fe, Ni, Pb, Pd, Pt, Rh, Sr, Th) kristallisieren in dieser Struktur. [4]
engl.: cubic face centered, cubic close packed
franz.: cubique à faces centrées

kubisch raumzentriert. Eine *Kristallstruktur des kubischen Systems, deren *Elementarzelle würfelförmig aus acht Eckatomen und einem in der Mitte des Würfels befindlichen Atom gebildet wird. Da jedes Eckatom zugleich acht Elementarzellen angehört, besitzt die k. r.e Elementarzelle zwei Atome. In dieser Struktur kristallisieren z. B. die Alkalimetalle, sowie Ba, Cr, α-Fe, Mo, Nb, Ta, V, W, Zr. [4]
engl.: cubic body centered *franz.: cubique centré*

Kugelfunktionsmethode, ein Verfahren zur angenäherten Lösung der *Boltzmann-Gleichung (Transportgleichung) durch Entwicklung nach Kugelfunktionen. Im stationären, monoenergetischen Fall kann diese Gleichung unter Voraussetzung von Kugelsymmetrie und konstanten Querschnitten in der Form

$$\mu \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1-\mu^2}{r} \frac{\partial F}{\partial \mu} + \alpha F = \frac{\beta}{2} \int_{-1}^{+1} F(r, \mu')\, d\mu'$$

geschrieben werden. Dabei bedeutet μ den cos des Winkels zwischen dem Radiusvektor und der betrachteten Richtung. Ferner gilt $\alpha = \Sigma_s + \Sigma_u + \Sigma_a$, $\beta = \Sigma_s + \Sigma_u + \nu\,\Sigma_f$ (die Indizes bedeuten: s elastische, u inelastische Streuung, a Absorption und f Spaltung). Die richtungsabhängige Neutronendichte $F(r, \mu)$ wird nun nach Kugelfunktionen entwickelt:

$$F(r, \mu) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (2\,n + 1) \cdot P_n(\mu) \cdot \Phi_n(r)$$

und diese Entwicklung in die obenstehende Gleichung eingeführt. Wenn man nun die Boltzmann-Gleichung mit $P_n(\mu)$ multipliziert und über alle μ integriert, ergeben sich die folgenden Gleichungen für die verschiedenen Momente des Flusses:

$$(n + 1)\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} + \frac{n+2}{r}\right)\Phi_{n+1}(r) + n \cdot \left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} - \frac{n-1}{r}\right)\Phi_{n-1}(r) + \alpha(2\,n + 1)\,\Phi_n(r) = \beta\,\delta_{0\,n}\,\Phi_0(r)\;.$$

Dabei bedeutet $\delta_{0\,n}$ das Kroneckersche Symbol, definiert durch $\delta_{0\,n} = 1$ für $n = 0$ und 0 für $n \neq 0$.

Die angeschriebenen Gleichungen werden zu einem e n d l i c h e n System, wenn man z. B. mit $\Phi_{2\,n+1}$ abbricht. Man spricht dann von einer $(2\,n + 1)$-Approximation. In diesem Falle lauten die Lösungen

$$\Phi_k(r) = \sum_{i=0}^{n} \left[A_i\,G_k(\nu_i)\,H_k(\nu_i\,\alpha\,r) + B_i\,G_k(-\nu_i) \cdot H_k(-\nu_i\,\alpha\,r)\right].$$

Darin sind die H_n modifizierte Besselfunktionen, während die G_n aus Legendreschen Funktionen zusammengesetzt sind. Die A_i und B_i sind $(2\,n + 1)$ willkürliche Konstanten, welche durch die Randbedingungen des Problems (Kontinuität sämtlicher Φ_k an Grenzflächen, Verschwinden des Stroms aus dem Vakuum) festgelegt werden können.

Die K. kann auch für andere Symmetrieverhältnisse verwendet werden. Man muß um so mehr Entwick-

lungsglieder berücksichtigen, je mehr sich in der Neutronenverteilung Vorzugsrichtungen ausprägen und je weniger isotrop die Streuung ist. Ist die Neutronenverteilung quasi-isotrop, so kann man mit $\Phi_1(r)$ abbrechen und es ergeben sich als P_1-Approximation zwei Gleichungen:

$$\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} + \frac{2}{r}\right) \Phi_1 + \alpha\,\Phi_0 = \beta\,\Phi_0 \,.$$

und
$$3\,\alpha\,\Phi_1 + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\,\Phi_0 = 0 \,.$$

Die zweite Gleichung kann als F i c k s c h e s Gesetz aufgefaßt werden. Setzt man sie in die erste ein und geht man von der Kugelsymmetrie wieder zu einer allgemeineren Geometrie über, so ergibt sich die D i f f u s i o n s g l e i c h u n g in der Form:

$$\mathrm{div}\,(D\,\mathrm{grd}\,\Phi_0) + (\nu\,\Sigma_f - \Sigma_a)\,\Phi_0 = 0 \,.$$

Die gewöhnliche Diffusionstheorie ist somit als P_1-Approximation in der Transporttheorie enthalten. [13]

engl.: spherical harmonics method

franz.: méthode des harmoniques sphériques

Lit.: A. Weinberg and L. Noderer, Theory of Neutron Chain Reactions, AECD-347, 1951. – B. Davison, Neutron Transport Theory, Oxford, 1957.

Kugelmanipulator, s. Manipulator.

Kugelpackung, dichteste, s. Nachtrag.

Kühlkanal, s. Brennstoffkanal.

Kühlkanal, gefährdeter. Der Entwurf eines *Leistungsreaktors wird meist durch eine oder mehrere thermische Begrenzungsvorschriften beeinflußt. Solche Forderungen sind z. B. a) kein Verdampfen der Kühlflüssigkeit im Reaktor, b) die Oberflächentemperatur der Brennstoffstäbe darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten, c) die Temperatur im Inneren der Brennstoffstäbe muß unter einem vorgegebenen Wert bleiben, d) die Temperatur des Kühlmittels darf einen bestimmten Höchstwert nicht überschreiten usw. In Leistungsreaktoren mit vielen parallelen, gleichdimensionierten Kühlkanälen ist die Enthalpiezunahme des Kühlmittels, der Temperaturabfall in der Grenzschicht und der Wärmefluß durch die Wand der Brennstoffstäbe in jedem einzelnen Kühlkanal verschieden. Es

muß daher stets der „gefährdete" Kanal oder eine „gefährdete" Stelle *(hot spot)* den gegebenen Vorschriften genügen. Zur Berechnung der thermischen Verhältnisse in einem solchen gefährdeten Kanal ist es üblich, Zuschlag-Faktoren *(hot channel factors)* zu benützen. Bezeichnet man einen Kühlkanal, der den Anforderungen einer konstanten über die Spaltzone gemittelten Wärmequellendichte genügt, als Nennkanal, so lassen sich die verschiedenen Faktoren folgendermaßen definieren:

Kühlkanal, gefährdeter

a) Der Faktor für den Entropieanstieg F_I ist das Verhältnis von maximalem Entropieanstieg ΔI_{max} zum Entropieanstieg $\Delta I_{\text{mitt.}}$ im Nennkanal

$$F_I = \frac{\Delta I_{\text{max}}}{\Delta I_{\text{mitt.}}} .$$

b) Der Faktor für den Temperaturabfall in der Grenzschicht F_Θ ist das Verhältnis von größtem, an einer bestimmten Stelle auftretenden Temperaturabfall $\Delta\Theta_{\text{max, örtl.}}$ zu dem mittleren Temperaturabfall $\Delta\Theta_{\text{mitt.}}$ im Nennkanal,

$$F_\Theta = \frac{\Delta\Theta_{\text{max, örtl.}}}{\Delta\Theta_{\text{mitt.}}} .$$

c) Der Faktor für den Wärmefluß ist das Verhältnis von größter Wärmestromdichte q_{max} zu der mittleren Wärmestromdichte $q_{\text{mitt.}}$ im Nennkanal

$$F_Q = = \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{mitt.}}} .$$

Die durch die drei Faktoren berücksichtigten Abweichungen von den Verhältnissen am Nennkanal sind zu einem großen Teil auf die ungleichförmige Neutronenflußverteilung zurückzuführen. Man kann die oben definierten Faktoren gemäß

$$F_I = F_I^K F_I^T , \quad F_\Theta = F_\Theta^K F_\Theta^T ; \quad F_Q = F_Q^K F_Q^T$$

aufspalten, wobei die durch den oberen Index K gekennzeichneten Faktoren den Einfluß der Neutronenflußverteilung berücksichtigen. Bezeichnet man das Verhältnis von maximalem thermischem Neutronenfluß zu dem in Achsenrichtung gemittelten Fluß mit $F_{||}$

und mit $F_\perp$ das Verhältnis des maximalen zu dem über den Querschnitt gemittelten thermischen Fluß, so ergibt sich

$$F_I^K = F_\perp\,, \quad F_\Theta^K = F_Q^K = F_\perp F_\| F_S \,.$$

Der Faktor F_S berücksichtigt dabei noch den Einfluß der örtlichen Wärmequellenspitzen. Solche können z.B. an Stellen entstehen, wo ein herausgezogener Kontrollstab eine Zone mit niedriger Xenon-Vergiftung hinterließ, oder an den Verbindungsstellen von zusammengesetzten Brennstoffelementen, wenn das Material zwischen den Uranstäben einen kleinen Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen hat.

Auch die Faktoren F_I^T, F_Θ^T und F_Q^T lassen sich noch weiter aufspalten und die zahlreichen technischen Einflüsse auf die Abweichungen von den Nennkanalgrößen können durch einzelne Faktoren getrennt beschrieben werden. Die Zuschlagfaktoren erfassen den ungünstigsten, aber sehr unwahrscheinlichen Fall, daß alle Abweichungen von den Nennkanalverhältnissen gleichzeitig an einer Stelle auftreten. [5]

engl.: hot channel *franz.: canal chaud*

Lit.: B. W. LeTourneau u. Grimble, Engineering Hot Channel Factors for Nuclear Reactor Design, Nucl. Science and Engineer. 1, S. 359–369 (1956). – R. Stephenson, Introduction to Nuclear Engineering, 2. ed., McGraw-Hill, New York, 1958.

Kühlkanal, zentraler, s. Nachtrag.

Kühlmittel. Die zur Kühlung von heterogenen Reaktoren geeigneten Flüssigkeiten und Gase sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

a) Geringer Absorptionsquerschnitt. Der Quotient aus Zahl der absorbierten Neutronen und transportierter Wärmemenge sollte möglichst klein sein. Bei festgehaltener Leistung ist der wesentliche Teil des Quotienten

$$\frac{\Sigma_a}{c_p \cdot \varrho \cdot v} = \frac{\sigma_a \cdot L}{c_p \cdot A \cdot v}\,,$$

worin $c_p \cdot \varrho \cdot v$ der Wärmemenge proportional ist, die den Reaktor pro Zeiteinheit verläßt (ϱ Dichte, v K.-Geschwindigkeit, $L = 6{,}03 \cdot 10^{23}$, A Atomgewicht).

b) Schlechter Moderator bei schnellen Reaktoren, möglichst guter Moderator bei thermischen Reaktoren.

c) Gute Wärmeübertragungseigenschaften.

Diese sind bei turbulenter Strömung um so besser, je kleiner der Zahlenwert von

Kühlmittel

$$\frac{\mu}{c_p{}^2 \varrho^2 \lambda \mathrm{Pr}^{0,4}}$$

ist, worin μ die Zähigkeit, c_p die spezifische Wärme, ϱ die Dichte, λ die Wärmeleitfähigkeit und Pr die *Prandtl-Zahl ist.

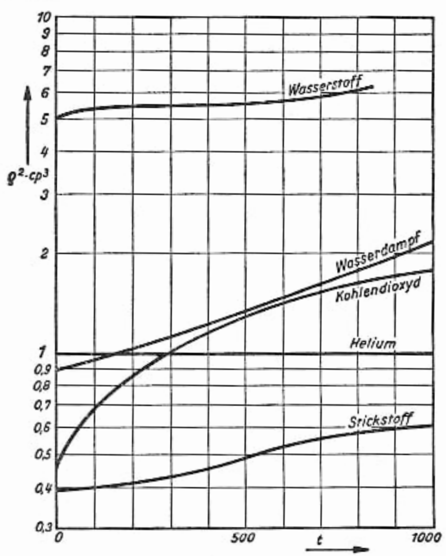
d) Niedere Pumpenleistung.

Die zur Abführung einer bestimmten Wärmemenge erforderliche Pumpenleistung ist bei konstanter Aufwärmspanne und konstantem Temperaturabfall in der Grenzschicht proportional zu

$$\frac{\mathrm{Pr}^{0,6}}{\varrho^2 \cdot c_p{}^3},$$

wobei ϱ die Dichte des Kühlmittels im Kühlkanal ist.

e) Chemische Verträglichkeit mit üblichem Struktur- und Rohrmaterial.



Kühlwirkung einzelner Gase, näherungsweise repräsentiert durch das Produkt $\varrho^2 \cdot c_p^3$, in Abhängigkeit von der Tempteratur *t* in °C.

Tabelle 1: Kühlmitteldaten

	Absorptions-querschnitt σ_a [barn]	spez. Wärme C_p (cal · g^{-1})	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C	Brems-vermögen a (cm^{-1})	Brems-verhältnis m	Wärme-leitfähigkeit K (cal · s^{-1} · cm^{-1}/°C)	Dichte (g/cm^3)	Induzierte Aktivität, deren Halbwertszeit u. Strahlung
Na	0,49	0,3055 (400 °C)	97,8	883			0,170 (400 °C)	0,854 (400 °C)	^{24}Na, 15 h, 2,8 MeV γ
Na-K (22 Gew.-% K)	1,67	0,21 (400 °C)	−11	794			0,064 (400 °C)	0,775 (400 °C)	^{42}K, 12,4 h 1,5 MeV γ ^{24}Na, 15 h
Bi	0,032	0,034 (271 °C)	271	1477			0,037 (271 °C)	10,0 (271 °C)	^{210}Bi, 5 d
Hg	380	0,033 (100° C)	−38,8	357			0,025 (100 °C)	13,35 (100 °C)	
Pb	0,17	0,037 (300 °C)	327	1717			0,036	10,7 (327 °C)	
Li	0,033 (Li^7)	1,04 (600 °C)	179	1317			0,08 (600 °C)	0,474 (600 °C)	^{8}Li, 0,83 s, 13 MeV β, γ
H_2O	0,66	1,25 (250 °C)	0,0	100	1,53	72	1,6 · 10^{-3} (100 °C)	0,958 (100 °C)	aus ^{16}O : ^{16}N
D_2O	0,0009	1,0 (40 °C)	3.8	101,4	0,170	12 000	1,4 · 10^{-3} (40 °C)	1,104 (40 °C)	7,3 s, 6 MeV γ
He	~0,000	1,25 (100 °C)			1,6 · 10^{-5}	83	4 · 10^{-4} (100 °C)	1,4 · 10^{-4} (100 °C)	
CO_2	0,003	0,23 (300 °C)					0,9 · 10^{-4} (300 °C)	9,5 · 10^{-4} (100 °C)	
Luft	1,5	0,25 (300 °C)					1,09 · 10^{-4} (100 °C)	6,2 · 10^{-4} (300 °C)	$^{41}_{18}$Ar, 1,8 h 1,4 MeV γ ^{16}N 7,3 s 6 MeV γ

Tab. 2: Wasserqualität bei Siedewasserreaktoren

Qualität des aus der Dampftrommel des Primärkreises direkt in den Reaktor fließenden Wassers	1. Verunreinigungen: keine 2. p_H-Wert: 7,2 ± 0,2 3. elektr. Widerstand: 1 MΩ cm
Dampf im Sekundärkreis	1. Gesamtgehalt an Feststoffen 100 ppm an Phosphaten 10 ppm an Silikaten 1 ppm 2. p_H-Wert 10
Reaktor-Speisewasser	1. elektr. Widerstand: 10 MΩ cm 2. Maximalgehalt an a) Kupfer 0,002 ppm b) Eisen 0,002 ppm c) Kobalt 0,000 ppm d) CO_2 0,01 ppm
Wasser aus Reinigungssystem	1. Widerstand: 1 MΩ cm 2. Maximalgehalt an a) Fluoriden 0,001 ppm b) Chloriden 0,01 ppm c) Natrium 0,01 ppm d) Silikaten 0,01 ppm

f) Niederer Schmelzpunkt.
g) Geringer Dampfdruck.
h) Stabilität bei hoher Temperatur und Bestrahlung.
i) Geringe induzierte Strahlungsaktivität, Reinheit.
j) Geringe Kosten.

Je nach der Art des Reaktors ist die eine oder andere der aufgezählten Eigenschaften von größerer Bedeutung. Einige der zur Kühlung von Reaktoren bisher in Betracht gezogenen Kühlmittel sind:

1. Flüssige Metalle: ^{7}Li, Na, NaK, Bi, Hg, Pb.
2. Flüssigkeiten: H_2O, D_2O, organische Substanzen (z. B. Diphenyl, Dowtherm).

3. Gase: He, CO_2, Luft, N.

In Tab. 1 sind wichtige Daten dieser Kühlmittel zusammengestellt. In Tab. 2 ist die im Primär- und Sekundärkreis eines Siedewasserreaktors (Zweikreissystem) geforderte Wasserqualität angeführt. [5, 21]

engl.: coolants

franz.: réfrigérant fluïde de refroidissement

Lit.: C. F. Bonilla, Nuclear Engineering, McGraw-Hill, New York, 1957. – C. Goodman, The Science and Engineering of Nuclear Power, Vol. II, Addison-Wesley, 1949, S. 123.

Kühlmittelaufbereitung ist in einem Reaktor aus folgenden Gründen nötig:

1. Verunreinigungen bei flüssigen Kühlmitteln führen zu einer erhöhten Zersetzung unter Strahleneinfluß.

2. Viele Verunreinigungen werden im Reaktor radioaktiv und geben zu einer Verseuchung des Kühlkreises Anlaß.

3. Sie können die Korrosion der Kühlkreismaterialien fördern.

4. Sie verschlechtern die Neutronenökonomie.

Die wichtigsten Quellen der Verunreinigungen sind:

a) Natürliche Verunreinigungen des Kühlmittels.

b) Korrosionsprodukte der Materialien im Primärkreis.

c) Spaltprodukte, die durch die meistens unvermeidliche Verunreinigung der Brennstoffelementoberfläche mit Uran bedingt sind.

d) Verunreinigungen, die durch Schäden im Primärkreis bzw. der Spaltzone (z. B. Brennstoffhülsenbruch, Undichtigkeiten) bedingt sind.

Aus den genannten Gründen ist man gezwungen, den Verunreinigungsgrad unter einer Grenze zu halten, die besonders bei flüssigkeitsgekühlten Typen weit unter der in konventionellen Anlagen üblichen liegt (s. Tab. 2 nach Angaben von General Electric zur Dresden Power Station). Im allgemeinen wird dies durch einen dem Kühlkreis parallelen Nebenkreis erreicht, der für einen ausreichenden Bruchteil der Kühlmittelmenge ausgelegt sein muß (unter Beachtung von Betriebsstörungen!).

In den entsprechenden Filtern – meistens sind es Ionenaustauscher – dieses Nebenkreises wird der überwiegende Teil der Verunreinigungen festgehalten. Es ist zu beachten, daß die Filtereinsätze radioaktiv werden können. Eine entsprechende Abschirmung und Vorrichtungen zu ihrem Auswechseln sind vorzusehen. Ein Reinigungssystem ist auch für das Zusatzkühlmittel notwendig. [21]
engl.: coolant make-up
franz.: régénération des réfrigérants

Kühlmittel-Druckverlust. Der K.-D. ist eine für die Optimalisierung einer Reaktorkonstruktion wichtige Größe, da er den Eigenbedarf des Reaktors an Energie bestimmt. Zu seiner Berechnung zieht man die Bewegungsgleichung des K. durch den Brennstoffkanal, die Bilanzgleichung der zugeführten Energie und die Kontinuitätsgleichung heran. Diese lauten für Kühlkanäle mit nicht stark veränderlichem Querschnitt:

$$\frac{\varrho}{g} v \frac{dv}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \frac{b}{a} \cdot r \frac{\varrho \cdot v^2}{2g}$$

$$q(z) - q_1 = \frac{q_a(z)}{c} - \frac{1}{2g}(v^2 - v_1^2)$$

$$a \varrho v = \text{konstant} = c$$

mit: ϱ Dichte, v Geschwindigkeit, g Erdbeschleunigung, z Koordinate entlang des Kühlkanals, p Druck, a Querschnitt des Kühlkanals, r Reibungskoeffizient (Funktion der Reynold-Zahl), q Wärmeinhalt, q_1 Wärmeinhalt am Kühlkanaleintritt, q_a zugeführte Wärmemenge im Kühlkanal bis zum Punkt z, b benetzter Rand des Kanals.

In der Energiegleichung ist angenommen, daß die gesamte Reibungswärme vom Kühlmittel aufgenommen wird. Für ein ideales Gas als Kühlmittel ergibt sich als Lösung dieser Gleichungen unter Verwendung der Karman-Nikuradse-Beziehung für den Reibungskoeffizienten r:

$$\frac{1}{\sqrt{r}} = 4 \log(\text{Re} \cdot \sqrt{r}) - 0{,}4\,, \qquad \text{Re} = \frac{\varrho \cdot v}{\mu} D\,,$$

wobei Re die Reynold-Zahl, μ die Zähigkeit und $D = 4\,a/b$ ist.

Kühlmittel-Druckverlust

und für eine konstante Wärmezufuhr entlang eines Kanals mit konstantem Querschnitt:

$$p = \left(\frac{p_1}{\varrho_1} + \frac{\varkappa - 1}{\varkappa} \frac{v_1^2}{2\,g}\right)\varrho -$$

$$- \frac{\varkappa - 1}{\varkappa}\left(\frac{1}{2\,g}\,\frac{c^2}{a^2}\cdot\frac{1}{\varrho} - \frac{q_a' \cdot z}{c}\cdot\varrho\right),$$

$$z = a\left[\sqrt{\frac{\vartheta + \varrho_1^2}{\vartheta + \varrho^2}} - 1\right] - \frac{\beta}{\sqrt{\vartheta}}\,\frac{1}{\sqrt{\vartheta + \varrho^2}}\ln\cdot$$

$$\cdot\left[\frac{\sqrt{\vartheta + \varrho^2} + \sqrt{\vartheta}}{\sqrt{\vartheta + \varrho_1^2} + \sqrt{\vartheta}}\cdot\frac{\varrho_1}{\varrho}\right]$$

$$\text{mit } a = \frac{\varkappa}{\varkappa - 1}\cdot\frac{c}{q_a'}\left(\frac{p_1}{\varrho_1} + \frac{\varkappa - 1}{\varkappa}\,\frac{v_1^2}{2\,g}\right)$$

$$\beta = \frac{1}{2}\,\frac{\varkappa + 1}{\varkappa - 1}\,\frac{c^3}{a^2\,g\,q_a'}$$

$$\vartheta = \frac{1}{2}\,\frac{\varkappa}{\varkappa - 1}\,\frac{c^3\cdot r\cdot d}{a^3\cdot g\cdot q_a'}$$

$\varkappa = c_p/c_v$, q_a' pro Längeneinheit zugeführte Wärme im Kanal $= q_a/z$.

Diese Gleichung für den Druckverlauf entlang des Kanals bzw. als Funktion der Dichte gilt auch für eine beliebige Wärmezufuhr im Brennstoffkanal, wenn man Ungenauigkeiten bis zu 0,6 % zuläßt. Läßt man Fehler von 1 ... 3 % zu, so kann die einfachere Guggenheim-Gleichung benutzt werden:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{4\,r}{D}\,c^2\cdot R\cdot T'\cdot l\left[1 + \frac{D}{2\,r\,l}\cdot\right.$$

$$\left.\cdot\left(\frac{T_2 - T_1}{T'} + \frac{T''}{T'}\ln\frac{p_1}{p_2}\right)\right],$$

T_1 Eintrittstemperatur, T_2 Austrittstemperatur,

$$T' = \int_{\text{Kanal}} T\,\mathrm{d}z\,;\quad T''\cdot\ln\frac{p_2}{p_1} = \int_{\text{Kanal}} \mathrm{d}\ln p\cdot T\,;\quad \frac{T''}{T'}\approx 1\,.$$

Aus der angegebenen Bewegungsgleichung folgt für ein

inkompressibles Kühlmittel die F a n n i n g - Gleichung

$$\Delta p = -\frac{4r}{D} \cdot \varrho \frac{v^2}{2} \Delta z .$$

Diese ist für einen ersten Überblick sehr gut brauchbar. Da flüssige Kühlmittel in diesem Zusammenhang als inkompressibel angesehen werden dürfen, gibt die F a n n i n g - Gleichung für diese den Druckverlust richtig wieder.

Bei den z. Z. gebauten gasgekühlten Reaktoren beträgt der Druckverlust in den Kühlkanälen etwa 0,6 atm, bei einem Druckwasserreaktor etwa 8 atm und bei einem Na-gekühlten Typ ca. 1,5 atm. S. a. Druckverlauf. [21]

engl.: pressure loss of coolant

franz.: pertes de charge du réfrigérant

Lit.: E. A. Guggenheimer, Compressible Flow of Perfect Gas with Heat Input Distributed Symmetrically about Middle of Channel, National Research Council M. T. 137, 1945. – J. Woodrow, Flow of a Compressible Coolant through a Channel, Harwell-Report, A.E.R.E. E/R 173. 1955.

Kühlmittel-Durchsatz, s. *Durchfluß.

engl.: coolant flow

franz.: débit du fluïde refroidissement

Kühlmittelkreisläufe. Zur Abführung der Wärme aus einem Reaktor können verschiedene Kühlsysteme benützt werden. Sie unterscheiden sich durch die Art des verwendeten Kühlmittels und durch einen verschiedenen Aufbau. Ein für fast alle Reaktortypen verwendbares Kühlsystem besteht aus einem „Primärkreislauf" und einem „Sekundärkreislauf". Das im Primärkreislauf zirkulierende Kühlmittel nimmt die Wärme im Reaktor auf und gibt sie in einem Wärmetauscher an das Kühlmittel des Sekundärkreislaufes ab. Wird dabei das Kühlmittel durch eine Pumpe oder ein Gebläse in Umlauf versetzt, so spricht man von einem „erzwungenen" Umlauf. Bei dem sog. „freien" Umlauf wird dagegen die Strömung durch Dichteunterschiede aufrechterhalten, die bei der Erwärmung und Kühlung des Kühlmittels entstehen. Im Sekundärkreislauf wird als Kühlmittel meist Wasser oder Luft benützt. Bei Kraftwerkanlagen wird das Wasser im Wärmeaustauscher verdampft und evtl. überhitzt. Der Dampf wird in einer Dampfturbine mit anschließendem Kondensator entspannt und kondensiert und dann über

einen oder mehrere Vorwärmer in den Wärmeaustauscher zurückgepumpt. Mit Gasen als Kühlmittel läßt sich bei genügend hohen Temperaturen ein Gasturbinenkreisprozeß durchführen. Bei Forschungsreaktoren, die keine nutzbare Leistung abgeben, kann der Sekundärkreislauf „offen" sein. Es wird dann einfach Flußwasser oder Außenluft durch den Wärmetauscher gepumpt. Das Zweikreissystem hat den Vorteil der freien Wahl des Reaktorkühlmittels und sorgt dafür, daß das mehr oder weniger radioaktive Kühlmittel des Reaktorkreises in einem möglichst einfachen Rohrsystem abgeschlossen bleibt. Bei natriumgekühlten Reaktoren empfiehlt es sich wegen der Radioaktivität des primären Na, zwischen Primär- und Sekundärkreislauf einen Zwischenkreislauf ebenfalls mit Na als Kühlmittel zu schalten. Einfache Kühlkreisläufe (ohne Sekundärkreislauf) können bei gasgekühlten und Siedewasserreaktoren Anwendung finden. – Bei Leistungsreaktoren sollte man statt von K.n von Arbeitskreisläufen sprechen. S. a. Kreislauf. [5]

engl.: coolant circuits
franz.: cycles de refroidissement, circuits de r.
Lit.: S. Glasstone, Principles of Nuclear Reactor Engineering, D. van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1955.

Kühlungsausfall, Wegfall der Leistungsabführung aus dem Reaktorinneren bei Stillstand oder Verlust des Kühlmittels. Der K. stellt wegen der aus wirtschaftlichen Gründen erforderlichen hohen Leistungsdichte in Reaktoren einen besonders ernsthaften Betriebsunfall dar und ist bezüglich der Temperaturgefahren völlig mit unkontrollierten Reaktivitätsänderungen vergleichbar. Er ist deshalb fast immer mit einer automatischen Schnellabschaltung der Leistung (*Schnellschluß) verknüpft. Wegen der unvermeidlichen radioaktiven *Nachwärme der Spaltprodukte sind jedoch auch dann *Temperaturschäden unvermeidlich, wenn nicht umgehend eine ausreichende *Notkühlung eingeschaltet wird.
Weniger gefährlich ist der K. durch Stillstand oder Verminderung der Kühlströmung bei Stromversorgungsunterbrechungen oder Pumpenschäden. Hier genügt im allgemeinen die Einschaltung geeigneter Not-

stromversorgungen oder Reservepumpen. Zur Überbrückung der Umschaltpause werden die Pumpen häufig mit einem besonders großen Trägheitsmoment ausgestattet. Wesentlich schwerwiegender ist der K., bei denen der Kühlmittelumlauf selbst durch Rohrbrüche oder Leitungsverstopfungen unterbrochen ist. Hier ist man auf zusätzliche *Notkühlkreisläufe mit dem gleichen oder einem anderen Kühlmittel angewiesen. Dabei muß darauf geachtet werden, daß beim Wegfall des alten oder Einfüllen des neuen Kühlmediums nur negative Reaktivitätsänderungen auftreten, daß der Reaktor also gegen beide Maßnahmen inhärent stabil ist. [9]

engl.: break-down of the cooling system
franz.: défaut de refroidissement

Lit.: M. A. Weinberg, W. Krasny-Ergen, Kjeller-Report, Oslo, 1953, S. 62 ff., J. Lipkin, Journ. Nucl. Energy 1, S. 203, 1955.

Kupfer (Cu). Schwermetall mit der Dichte 8,96; Ordnungszahl 29, Atomgewicht 63,5. Schmelzpunkt 1083°, Siedepunkt etwa 2600°. Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen $\Sigma_a = 0{,}31 \text{ cm}^{-1}$. Kristallstruktur: kubisch flächenzentriert.

Reines K. hat eine gute elektrische Leitfähigkeit, eine gute Wärmeleitfähigkeit, ist leicht verformbar und hat gegenüber vielen Agenzien eine gute chemische Beständigkeit. Es wird daher häufig für elektrotechnische Zwecke, für Wärme-, Heiz- und Kochgeräte, Behälter, Apparate und für *Plattierungen verwendet. Da die Festigkeit von reinem K. nicht sehr groß ist, ist seine Verwendungsmöglichkeit für mechanisch beanspruchte Teile begrenzt. Legierungen des K.s mit Zink (*Messing), Zinn (*Bronze) und mit anderen Metallen finden jedoch häufige Anwendung. [4]

engl.: copper *franz.: cuivre*

Kupfer 64, das gebräuchliche radioaktive Isotop des Metalls Kupfer mit einer Halbwertszeit von 12,8 Stunden. Man erhält das Isotop durch Bestrahlung von Kupfer mit langsamen Neutronen (n, γ-Prozeß) oder von Zink mit schnellen Neutronen (n, p-Prozeß). Bei der Wichtigkeit dieses Elements in metallischer und chemisch gebundener Form wird das Isotop

häufig als *Leitisotop und radiochemischer *Indikator verwendet.

Strahlung:	K-Strahlung:	43 %	
	Betastrahlung:	38 %	0,57 MeV
	Positronenstr.:	19 %	0,66 MeV

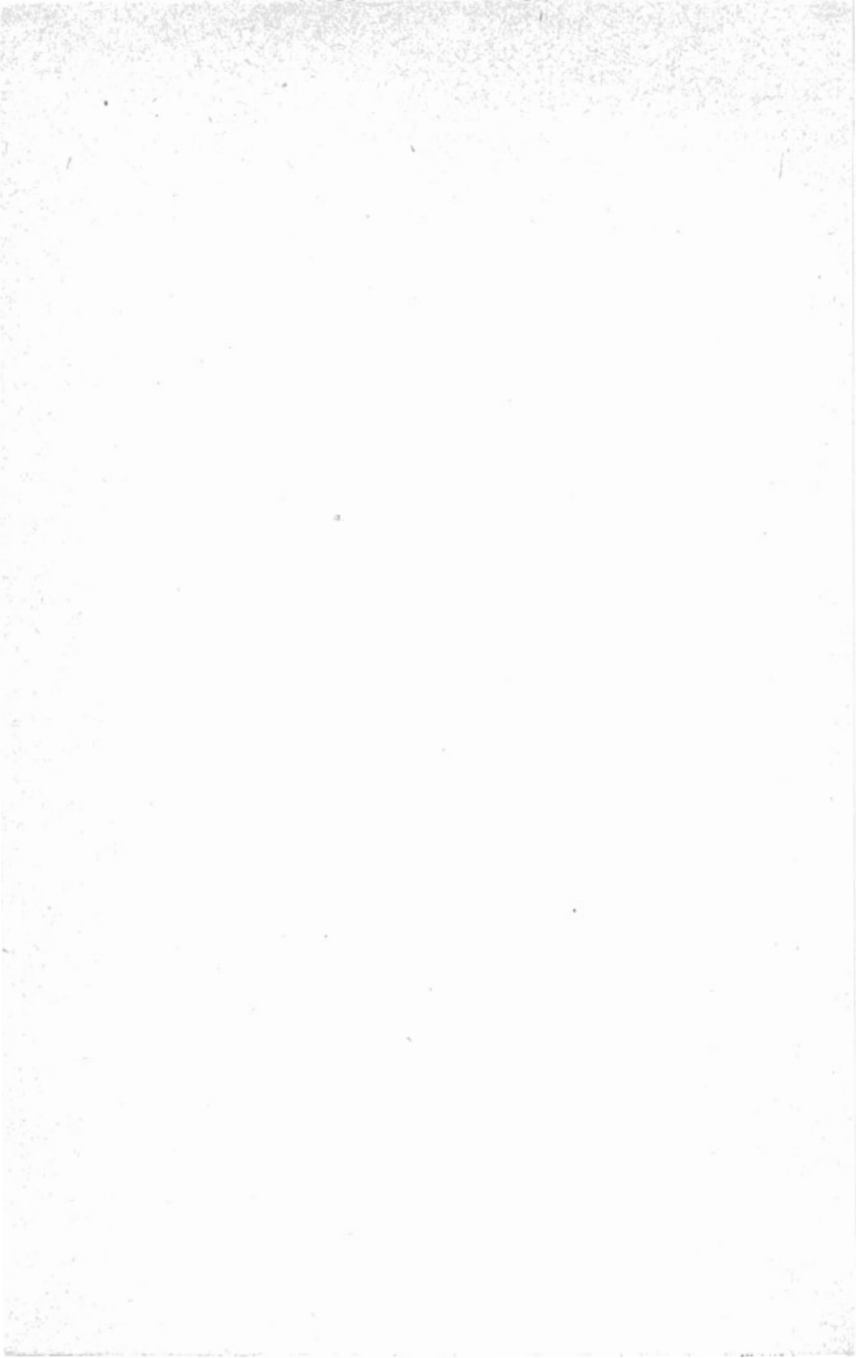
[16]

Kupfersulfid (Cu_2S) eignet sich als vorzüglicher Träger zur Entfernung von kolloidalen Verunreinigungen aus den Speiselösungen der Brennstoffaufbereitungsprozesse. [22]
engl.: copper sulfide
franz.: sulfure de cuivre

Kurzzeitverhalten des Reaktors, s. Reaktorkinetik.
engl.: short time behavior
franz.: comportement à brève échéance

Kymoskop, Vorrichtung, mit der Bewegungsvorgänge an Körperorganen auf dem Röntgen-Film so dargestellt werden können, daß ihre einzelnen Phasen daraus ersichtlich werden. Mit Hilfe eines Rasters erfolgt eine streifenweise Belichtung einer Reihe von Augenblicksbildern, neben- bzw. übereinander angeordnet, die den Bewegungsablauf eines Organs in Teilbildern festhalten. Bedingung ist dabei, daß das Organ in seiner Gesamtheit zu erkennen ist. Schlitzweite und Rasterteilung müssen nach den Daten der Aufnahme eingestellt werden. [28]
engl.: kymoscope
franz.: kymoscope

Tabellenübersicht



Militärische Leistungsreaktoranlagen der USA

Bezeichnung		Ort	Erbauer[1])	Typ	Inbetriebnahme
Prototypen und Experimente					
ARE	(Aircraft React. Exp.)	Oak Ridge, Te.	ORNL		wieder abgebaut
S1G	(Submarine Interm. Re.)	West Milton, NY.	GE	Na	1955–57
S1W	(ehem. MARK 1) (Subm. Thermal Re.)	NRTS Idaho	WEST	Druckwasser	1953
HTRE-1	(Heat Transfer Re. Exp.)	NRTS Idaho	GE		1956
APPR-1	(Army Package Power Re.)	Fort Belvoir, Va.	ALCO	Druckwasser	1957
A1W	(2 Große Schiffsreaktoren)	NRTS, Idaho	WEST	Druckwasser	im Bau
S3G	(Submarine Advanced Re.)	West Milton, NY.	GE	Druckwasser	im Bau
HTRE-2	(Heat Transfer Re. Exp.)	Lockland, Ohio	GE		,,
S1C	(Small Submarine Re. Protot.)	Windsor, Conn.	CE	Druckwasser	,,
ART	(Aircraft Reactor Test)	Oak Ridge, Tenn.	ORNL		,,
ALPR	(Argonne Low Power Re.)	NRTS, Idaho	ANL	Siedewasser	,,
Militärische Anlagen					
SSN 571	(U-Boot Nautilus)		WEST	Druckwasser	1955
SSN 575	(U-Boot Seawolf)		GE	urspr. Na durch Druckw. ersetzt	1956
SSN 578	(U-Boot Skate)		WEST	Druckwasser	im Bau
SSN 579	(U-Boot Swordfish)		WEST	,,	,,
SSN 583	(U-Boot Sargo)		WEST	,,	,,
SSN 584	(U-Boot Seadragon)		WEST	,,	,,
SSN 585	(U-Boot Skipjack)		WEST	,,	,,
SSN 586	(2 Reaktoren) (U-Boot Triton)		GE	,,	,,
SSG (N) 587	(U-Boot Halibut)		WEST	,,	,,
6 weitere U-Boote					
CLGN	(2 Reaktoren) (Raketenkreuzer)		WEST	,,	,,

[1]) ANL Argonne National Laboratory, University of Chicago
CE Combustion Engineering Inc.
ORNL Oak Ridge National Laboratory (Union Carbide & Carbon Corp.)
WEST Westinghouse Electric Corp.
ALCO Alco Products Inc. (American Machine & Foundry Co.)
GE General Electric Co.

Zivile Leistungsreaktorenanlagen der Länder

Land	Bezeichnung	Ort	Erbauer[1])	Typ	Leistung [WM-th]	Leistung [WM-el]	Kosten [10^6\$]	Zeitpunkt der Inbetriebnahme
Kanada	NPD 2	Des Joachims	CGE	nat.U-D_2O	86	20	14,5	1959
Frankreich	G-1	Marcoule	FA	nat. U-C-Luft	40	5		1956
	G-2; G-3	,,	,,	nat. U-C-CO_2	150	30		1957, 1958
	EDF-1; EDF-2	Avoine		nat. U-C-CO_2	300	60	28	1959, 1960
Norwegen		Halden		D_2O-Siedew.	20		3,5	1958
Schweden	R3a, (Adam)	Farsta		nat. U-D_2O	76			1960
Großbritannien	Calder-HallA, B (je zwei Reaktoren)	Calder Hall, Engl.		nat. U-C-CO_2		je 46	2 A zus. 45	1956,1957 1958
	Chapel Cross A, B (je zwei Reaktoren)	Chapel Cross, Schottland		nat. U-C-CO_2		je 46		1958, 1959
	Bradwell (2 Reaktoren)	Bradwell, Engl.	NNP	nat. U-C-CO_2		je 150		1960
	Berkeley (2 Reaktoren)	Berkeley, Engl.	AEI-JTN	nat. U-C-CO_2		je 137		1960
	Hinkley Point (2 Reaktoren)	Hinkley Point, England	EE-BW-TW	nat. U-C-CO_2		je 137		1961
	Hunterston (2 Reaktoren)	Hunterston, Schottland	GE-SC	nat. U-C-CO_2		je 160		1960
	Dounreay	Dounreay, Schottl.		schnell. Brüter	60	20		1958
USA	Power Reactor Development Co. Inc.	Monroe, Mich.	PRDC	schnell. Brüter		100		1960
	General Electric Co. und Pacific Gas & Electr. Co.	bei Livermore, Cal.	GE	Siedewasser		3		1958
	AEC u. Duquesne Light Co. (PWR-Pressur. Wat. Re.)	Shippingport, Pa.	WEST	Druckwasser		60		1957
	Commonwealth Edison Co.	Dresden, Ill.	GE	Siedewasser		180		1960
	Consolidated Edison Co. of N.Y.	Indian Point, NY.	B & W	Druckwasser		250		1960

Land	Bezeichnung	Ort	Erbauer[1])	Typ	Leistung [MW-th]	Leistung [MW-el]	Kosten [10^6 $]	Zeitpunkt der Inbetriebnahme
Deutschland	RWE-Versuchsatomkraftwerk Kahl	Kahl b. Aschaffenb.	AEG, GE	UO_2 Siedewasser	60	16		1960
UdSSR	1. Reaktorstation	Obnisk b. Moskau		5% anger. U C, Druckw.		5		24. Juni 1954
	1. Großkraftwerk (6 Reakt.)	Sibirien		C nat. U-Druck.		je 100		7. Sept. 1958
	Antriebsanlage (mehrere)	Obninsk b/Moskau		Druckwasser		2		Dez. 1958
	Lenin-Eisbrecher (3 Reaktoren)			5% anger. UO_2 C-Druckw.	je30	je 5		1959
	Kraftwerk (2 Reaktoren)	Woronesch		1,5% anger UO_2 Druckwasser		je 210		1961
	Kraftwerk (2 Reaktoren)	Leningrad		1,5% ang. UO_2 Druckwasser		je 210		1961
	Kraftwerk (4 Reaktoren)	Beloyarsk (Ural)		1,3% ang. U C-Druckw.		je 100		in Bau
	Kraftwerk (Wolgadistrikt)	Ulyanowsk		Siedewasser		50		in Bau

[1]) CGE Canadian General Electric Co. Ltd.
FA France Atome
NPP Nuclear Power Plant Co.
AEI-JTN AEI-John Thompson Nuclear Energy Co. Ltd.
EE-BW-TW English Electric-Babcock & Wilcox-Taylor Woodrow
GE-SC General Electric Co. Ltd. — Simon Carves
PRDC Power Reactor Development Co. Inc.
GE General Electric Co.
WEST Westinghouse Electric Corp.
B & W Babcock & Wilcox Co.
AEG Allgem. Elektrizitäts Gesellschaft

Plutoniumerzeugungsreaktoren

	Reaktoren	Erbauer bzw. Inbetriebn.	Moderator	Kühlung
I. USA				
Hanford, Wash.,	B, D, F	DuPont	Graphit	
Hanford, Wash.,	C,DR,H,KE,KW	G E	Graphit	
Savannah River, S. C.,	R, P, K, L, C	DuPont	D_2O	
II. Großbritannien				
Windscale	A : 2	1950	Graphit	Luft
Calder Hall, Cumberland	A : 2	1956/7	Graphit	CO_2
	B : 2	1958/9	Graphit	CO_2
Chapel Cross, bei Annan	A : 2	1959	Graphit	CO_2
Dunfriesshire	B : 2	1959/60	Graphit	CO_2
III. Frankreich				
Marcoule	G 1	1956	Graphit	Luft
Marcoule	G 2	1958	Graphit	CO_2
Marcoule	G 3	1959	Graphit	CO_2

Reaktortabelle

Die Reaktortabelle gibt den Stand von Mitte 1958 wieder. Aufgenommen wurden:

1. Solche Reaktoren, die in Betrieb sind oder waren,
2. solche, die sich im Bau bzw. fortgeschrittenen Stadium der Konstruktion befinden, und über die Angaben vorliegen.

Da über russische Leistungs-Reaktoren i. a. nur sehr spärliche Angaben vorliegen, haben wir uns bei diesen mit der Zusammenstellung in der Leistungs-Reaktor-Tabelle begnügen müssen. Entsprechend wurden Nullreaktoren behandelt, Tab. beim Stichwort.
Es ist zu beachten, daß ein Großteil der Forschungsreaktoren im Laufe der Zeit mehrfach umgebaut wurde. Dies betrifft insbesondere die sowjetischen Reaktoren. In der Tabelle wurden die Vorgänge z. T. vermerkt.

In den Quellen ist nicht immer ersichtlich, in welcher Weise der Lastfaktor bei der Lebensdauer der Brennstoffelemente berücksichtigt wurde. Ferner ist unsicher, ob bei der Leistungsangabe Brutto- oder Nettoleistung gemeint ist.

Abkürzungen: Als Materialangabe: St rostfreier Stahl

In der Spalte: Verwendung

A	Ausstellungsreaktor
B	Brutreaktor
E	Elektrizitätserzeugung
F	Forschungsreaktor
I	Isotopenerzeugung
K	Lebensmittelkonservierung
L	Leistungsreaktorexperiment
S	Schiffsantriebsreaktor
U	Unterrichtsreaktor
V	Versuchsreaktor
W	Wärmeerzeugung f. Heizkraftwerke

In den Spalten: Eigentümer bzw. Entwurf

AB-Atom-energi	Aktiebolaget Atomenergi, Schweden
ACF	ACF Industries, Inc
AdW-UdSSR	Akademie der Wissenschaften der UdSSR
AEC	Atomic Energy Commission
AECL	Atomic Energy of Canada, Ltd
AEI	John Thompson Associated Electr. Industries — John Thompson Nuclear Energy Co., Ltd England
AERE	Atomic Energy Research Establishment, England
AGN	Aerojet General Nucleonics
Alco	Alco Products Inc.
AMF	American Machine and Foundry Inc.
ANL	Argonne National Laboratory (University of Chicago)
B + W	Babcock u. Wilcox
BAC	Bendix Aviation Corp.
BMI	Batelle Memorial Institute
BNL	Brookhaven National Laboratory
CE	Combustion Engineering
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique (Frankreich)
CEAN	Centre d'Etudes pour les Applications de l'Energie Nucléaire (Belgien)
CMI	Christian Michelsens Institutt, Schweden
Convair	Consolidated Vultee Aircraft Corp.
Daystrom	Daystrom Inc.
DuPont	E.I. DuPont de Nemours Co.
FW	Forster Wheeler Corp.
GE	General Electric Co.
GE-KAPL	General Electric Co. — Knolls Atomic Power Lab.
GNE	General Nuclear Engineering Co.
IFA	Institutt for Atomenergi Schweden
KE	Kaiser Engineering
LASL	Los Alamos Scientific Lab. (University of California)
Martin	Martin Co.
Met-Lab.	Metallurgical Lab. of Manhatten Eng. District
NAA	Atomics International, a Division of North American Aviation Inc.
NRL	Naval Research Lab.
ORNL	Oak Ridge National Lab.
PPC	Phillips Petroleum Co.
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Authority, England
USAEC	United States Atomic Energy Commission
USAF	US Air Force
West	Westinghouse Electric Corp.
West-Bettis	Westinghouse Bettis Plant
West-CAPA	Westinghouse-CAPA

I. Schwimmbeckenreaktoren, Moderator H_2O, thermisch, heterogen

		Bezeichnung	Ort	erstmals kritisch
1	BSR = BSF	Bulk Shielding Reactor = Bulk Shielding Facility	Oak Ridge, USA	17. Dez. 50
2	GTR	Ground Test Reactor	Fort Worth, USA	1953
3	TSFR-1	Tower Shielding Facility Reactor No 1	Oak Ridge, USA	März 54
4	GR	Genfer Konferenz Reaktor (jetzt siehe Nr. 11)	Genf, Schweiz	Betrieb Juli-Sept. 55
5	PENN	Pennsylvania State University Reactor	University Park PA., USA	15. Aug. 55
6	FNR	Ford Nuclear Reactor University of Michigan	Ann Arbor, USA	19. Sept. 57
7	APSARA	Trombay Pool Reactor	Trombay, Indien	4. Aug. 56
8	BMI	Batelle Memorial Institute Reactor	West Jefferson, USA	1956
9	NRL	Naval Research Laboratory	Washington, USA	Nov. 56
10	LIDO		Harwell, England	Sept. 56
11	SAPHIR	Schweizer Atomreaktor (ehemals GR, Nr. 4)	Würenlingen, Schweiz	17. Mai 57
12	ORR	Oak Ridge Research Reactor	Oak Ridge, USA	Apr. 57
13	FRM	Forschungsreaktor München (ähnlich Nr. 8)	Garching, Deutschland	31. Okt. 57
14	LPTR	Livermore Pool Type Reactor	Univ. of California, Livermore, USA	1957
15	PTR	Pool Test Reactor	Chalk River, Canada	
16	SPAIN	Moncloa Pool Reactor	Moncloa, Spanien	
17 18	MERLIN	Med. En. Light Water Mod. Indust. Nucl. Reac.	1.) Aldermaston, 2.) Düren, Dtschld.	1957 1958
19	LISBON	Lisbon Pool Reactor	Lissabon, Portugal	1958
20	SAOP	Univ. of Sao Paolo Research Reactor	Sao Paolo, Brasilien	
21	FRH	Forschungsreaktor Hamburg	Geesthacht, Deutschland	28. Okt. 58
22	IRT		Mosk. Tbilisi, Sverdlowsk, Minsk, Tomsk	23. Sept. 57
23	MELUSINE		Grenoble, F.reich	1. Juli 58

In Bau sind Triton und Minerve, Frankreich, wie Melusine.

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills/kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
USAEC, ORNL	ORNL	F	0,5			0,05
US Air Force	Convair	F				
USAEC, ORNL	ORNL	F				
AEC	ORNL	A	0,35			
Penn. State University	Coll. of Engineering	F, U	0,308			
University of Michigan	B + W	F	1			
AEC-Indien	AEC-Indien	F, I	0,63			
BMI	BMI	F	0,75			
NRL	Petticord Mills	F	1,25			
UKAEA	AERE	F				
Reactor Ltd.	ORNL	F	0,75			
USAEC, ORNL	ORNL	F, V	3,9			
T. H. München	AMF	F	1			
USAEC	FW	F	0,65			
AECL-Canadair	Canadair	F	0,2			
Junta de En. Nucl. Spanien	GE	F				
Assoc. EL. Ind.	AEI – John Thompson	F	0,2			
Junta de En. Nucl. Portugal						
	B + W	F				
	B + W	V				
UdSSR		F, I				
		F				

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung D = Durchmesser L = Länge	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	BSR = BSF	> 90% U-235	25 MTR-Elem. zu 18 Pl. 7,6 × 7,6 × 61 cm		3,5 (H_2O-Refl.) 2,3 (Be-Refl.)	
2	GTR					
3	TSFR-1	90% U-235	35 MTR-Elemente zu 18 Platt. 7,6 × 7,6 cm	4	3,5	
4	GR	20% U-235	20 MTR-Elemente mit 18 Platten	3,7	3,5	
5	PENN	90% U-235	MTR-Elemente mit 10 Platten	3,5	2,7	
6	FNR	89,5% U-235	27 MTR-Elemente	3,06		
7	APSARA	anger. U	25 – 30 dünne Platten			
8	BMI	90% U-235	18 MTR-Elemente mit 10 Pl. 7,6 × 7,6 × 61 cm	5,2	2,8	
9	NRL	90% U-235	25 – 30 MTR-Elemente	5	2,7(C+H_2O-Refl.) 3,4 (H_2O-Refl.)	
10	LIDO	anger. U				
11	SAPHIR	20% U-235	MTR-Elemente mit 18 Platten		3,7	
12	ORR	90% U-235	24 MTR-Elemente mit 19 Platt. + 4 Regelel.	3,5 – 4	2,8	
13	FRM	20% UO_2	22 MTR-Elemente mit 18 Pl.(UAl_4 + Al-Leg).	4,28	3,58	
14	LPTR	90% U-235	21 MTR-Elemente mit 18 Platten	3,9	2,7	
15	PTR	90% U-235	35 Elemente mit 10 Platten	6	3	
16	SPAIN	20% U-235			3,4	
17 18	MERLIN	20% UO_2	MTR-Elemente	4,5		
19	LISBON	20% U-235				
20	SAOP	20% U-235				
21	FRH	20% U-235	MTR-Elemente	4,4	3,85	
22	IRT		26 – 48 Elemente mit 16 Brennstoffstäben	3,5 – 6		
23	MESULINE	20% U-255				

Reflektor	Neutronenfluß thermisch n/cm^2s	Neutronenfluß schnell n/cm^2s	Spezifische Leistung [kw/kg]	Leistungsdichte [kw/l]	Abbrand [%]	Lebensdauer der Brennstoffelemente	Konversionsgrad	Temperatur-Koeffizient [$°C^{-1}$]
I_2O od. Be	10^{13}	$3 \cdot 10^{13}$	280	14 max.				$-8 \cdot 10^{-5}$ (20–60 °C)
I_2O	$9 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^{12}$	116	4,3				
I_2O: ∞ effekt.	$7,3 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{12}$	27	1,2				$-6 \cdot 10^{-5}$ (20 °C)
I_2O, C	(Oberfl.) $7,4 \cdot 10^{11}$	(Oberfl.) $4,2 \cdot 10^{11}$	37		10	5a		$-8 \cdot 10^{-5}$
: 15 cm I_2O: ∞ I_2O	10^{13} (Mittel)		330	14,1	10	1a		$-1,1 \cdot 10^{-4}$
I_2O	10^{13}	10^{13}	350	11,5	20			
I_2O od. + H_2O	10^{12}	$3 \cdot 10^{11}$	30	1				$-6 \cdot 10^{-5}$
	$1,5 \cdot 10^{12}$							
I_2O	$7 \cdot 10^{12}$		270					
e: 7,5–15 cm I_2O: 10–12,5 cm	$1,3 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{14}$ (epith.)	5000	210	15–30 (gesch.)	2 Wochen(?)		$-1,1 \cdot 10^{-4}$
I_2O	$1,8 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$ (max.)	220	8,9	25	855 MWd		$-9 \cdot 10^{-5}$
	$2,5 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	250	10	15	3 Wochen		$-6 \cdot 10^{-5}$
: 3,8 cm H_2O	$2 \cdot 10^{11}$							
			880					
I_2O: 7,5–10 cm	$5 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{14}$ (max. ep.)						
	10^{13}							
I_2O od. C	$3,2 \cdot 10^{13}$ (max.)	$6,7 \cdot 10^{13}$ (max.)	1300					
I_2O	$3,6 \cdot 10^{13}$ (max)		1700 (max)		20	1,20 a		
I_2O	10^{13}							

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	BSR ≡ BSF	H_2O Refl.: 38×46×61cm BeRefl.: 30 × 38 × 61cm	Al	Al	Beton	3 B_4C-Stäbe 1 Stab aus St.
2	GTR					Cd-Stäbe
3	TSFR-1	38 × 54 × 61 cm	Al			2 Al-B-Pb-Stäbe 1 Al-St.-Stab
4	GR	38 × 38 × 61 cm	Al	Al	Al, Fe	3 B_4C gefüllte Stäb
5	PENN	38 × 38 × 61 cm	Al			3 B_4C-Stäbe
6	FNR	31 × 38 × 61 cm	Al	Al	Al	1 St.-Stab
7	APSARA	61 × 61 × 61 cm	Al			
8	BMI	31 × 46 × 61 cm	Al	Al	Al	4 B_4C-Stäbe
9	NRL	40 × 40 × 60 cm	Al	Al	Al	1 St.-Regelstab 3 B_4C-Sicherheitst.
10	LIDO				Al	4 Cd-Stäbe
11	SAPHIR	38 × 41 × 61 cm	Al	Al + O		3 B-Stäbe
12	ORR	31 × 52 × 61 cm	Al, St	Al	Al	4 U-235-Stäbe (bis zu 12 möglich)
13	FRM	41 × 48 × 61 cm	Al	Al	Al, St	5 B_4C-Tr.- u. Sich.-stäbe, 1 St.-Regst.
14	LPTR	38 × 54 × 61 cm	Al	Al	Al, St	1 St.-Stab 4 B_4C-Stäbe
15	PTR	verschieden, bis zu 69 × 69 × 69 cm	Al	Al		2 Abschaltstäbe 2 Regelstäbe
16	SPAIN		Al		Beton	1 fein-, 1 grob- u. 2 Sich.pl. in Al
17 18	MERLIN	69 × 69 × 61 cm	Al			
19	LISBON					
20	SAOP					
21	FRH			Al		3 B-Stäbe 1 Regelstab
22	IRT		Al	Mg		
23	MELUSINE					

Abschirmung	Brennstoffelemente: mittl. Wärmefluß [kcal/m²h]	Brennstoffelemente: Oberfl. Temp. [°C]	Kühlmittel: Stoff	Kühlmittel: Austrittstemp. [°C]	Kühlmittel: Druck [at]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Temp. [°C]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Druck [at]	Leistung: Wärme [MW]	Leistung: Elektr. [MW]
H_2O: > 520 cm			H_2O		1			1	
			H_2O						
H_2O variabel	5426		H_2O	50 (max)	1			0,5	
H_2O, Erde	2442		H_2O					0,1	
H_2O: 5,8 m			H_2O					0,1	
H_2O: 6,1 m od. Baryt B.: 2 m + H_2O: 1,2 m	23061		H_2O	38				1 (spät. 5)	
H_2O + Beton: 2,6 m			H_2O					1	
H_2O, Baryt-Beton		44	H_2O	38	1			1	
H_2O od. C: 30cm B: 0,6 cm, Pb: 10cm Bet. 1,5m			H_2O					0,1	
H_2O, Beton: 2,1 m			H_2O					0,1	
H_2O			H_2O	38	1			1	
H_2O: 1,5 m, Baryt-Beton		100	H_2O	55	25			20	
H_2O: 1,5 m Beton: 1,5 m	20348		H_2O	30				1	
H_2O, Pb, Magnetit-Beton	46935	38	H_2O	33	1			1	
H_2O, Beton		niedrig	H_2O	Umgebung	1			0,01	
H_2O, Pb, Beton			H_2O					3	
H_2O, Baryt-Beton		80 (max)	H_2O	45				5	
			H_2O					1	
H_2O			H_2O					5	
H_2O, Baryt-Beton, Pb, Fe			H_2O	46				5	
	$4,8 \cdot 10^5$	90	H_2O					2	
			H_2O					1,2	

II. **Tank Typ,** Moderator H_2O, thermisch, heterogen

	Bezeichnung		Ort	erstmals kritisch
1	LITR	Low Intensity Test Reactor	Oak Ridge, USA	Febr. 50
2	MTR	Materials Testing Reactor	Arco, USA	31. März 52
3	RPT[1])	Reaktor für phys. u. techn. Forschung	UdSSR	April 52
4	OMEGA	Omega West	Los Alamos, USA	5. Juli 56
5	ETR	Engineering Test Reactor	Arco, USA	19.Sept.57
6	BMRR	Brookhaven Medical Research Reactor	Upton, USA	
7	WTR	Westinghouse Testing Reactor	Waltz Mill, USA	
8	AFNETR	Air Force Nucl. Eng. Test. Reactor	Ohio, USA	1958
9	WAR	Watertown Arsenal Reactor	Watertown, USA	1958
10	DTTR	Danish Tank Type Reactor	Risö, Dänemark	1958
11	NACA	National Advisory Committee for Aeronautics	Sandusky, USA	1959
12	WWR-S	Wasser-Wasser-Reaktor	1. UdSSR 2. Prag 3. Warschau 4. Dresden	2-4: 1958
13	NMTR	Netherlands Materials Testing Reactor		
14	TRIGA[2])	Train. Research Isotop R., General Atomic	San, Diego USA	1958
15	WWR-2		UdSSR	
16	WWR-M		UdSSR, China	
17	WWR-Z		UdSSR	
18	HERALD		Aldermaston England	1958
19	DR 2		Risö, Dänemark	1958

[1]) Moderator C und H_2O
[2]) Moderator H_2O und Zirkonhydrid

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills/kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
USAEC, ORNL	ORNL	F, V	1,1			
USAEC	ORNL, ANL	F, V	18			
AdW-UdSSR	AdW-UdSSR	F, I				
USAEC, LASL	LASL	F				
USAEC	PPC	F	17,2			
USAEC	BNL	F	0,95			0,1
West	West	F	6,5			
US Air Force		F	7			
Ord. Mat. Res. Office	BAC	F				
Dänische AEC	FW	F				
NACA	NACA	F				
		F				
Reactor Centrum Nederland	ACF	F				
General Atomic	General Atomic	F, I U				
		F				
		F				
		F				
		F				
	FW	F				

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung D = Durchmesser L = Länge	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	LITR	90% U-235	24 MTR-Elemente mit 19 Platten	3,4	2	
2	MTR	90% U-235	23 MTR-Elem. mit 19 Platt. 7,6 × 8 × 90 − 120 cm	4,5	3	
3	RPT	90% U-235	20−25 Elemente	5,5	4,2	
4	OMEGA	> 90% U-235	variable Anzahl MTR-Elemente			
5	ETR	> 90% U-235	49 MTR-Elem. mit 19 Platt. 7,6 × 7,6 × 140 cm	14	14	
6	BMRR	90% U-235	17 MTR-Elemente	2,66	2,38	
7	WTR	hochanger. U	60 zylindr. Elemente	12	8,5	
8	AFNETR	mittl. anger. U	35 MTR-Elemente	14,04	4,68	
9	WAR	90% U-235	MTR-Elemente	3,5	3	
10	DTTR	20% U-235	30 MTR-Elemente	5,5		
11	NACA	90% U-235	27 Elem. mit 18 Platten 7,6 × 7,6 × 63,5 cm		~4,4	
12	WWR-S	10% U-235	823 Stäbe, 1 cm D, 50 cm L	4,6	3,2	
13	NMTR	20 oder 90% U-235	~30 Elemente			
14	TRIGA	20% U-235	60 U-ZrH Brennstoff-Moderator-Elemente	2	2	
15	WWR-2	10% U-235		3,5		
16	WWR-M	20% U-235		4		
17	WWR-Z	20% U-235		4,5		
18	HERALD					
19	DR 2	90% U-235	MTR-Elemente	4		

Reflektor	Neutronenfluß thermisch n/cm²s	Neutronenfluß schnell n/cm²s	Spezifische Leistung [kW/kg.]	Leistungsdichte [kW/l]	Abbrand [%]	Lebensdauer der Brennstoffelemente	Konversionsgrad	Temperatur Koeffizient [°C⁻¹]
Be: 20,3 cm	$2{,}9 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	880	31,4	25	~ 2a		$-1{,}7 \cdot 10^{-2}$
Be, C	$5{,}5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$	8900	416	30	10d		$-1{,}7 \cdot 10^{-2}$
H_2O, C	$1{,}85 \cdot 10^{14}$		5500		30 - 34			$-6{,}7 \cdot 10^{-5}$
H_2O: 90 cm	10^{13}	$2 \cdot 10^{13}$						$-3{,}9 \cdot 10^{-5}$
Be: 11,4 cm, Al	$4 \cdot 10^{14}$	$1{,}5 \cdot 10^{14}$	12500	494	~ 30	17d bei 3500 MWd to		$-3{,}5 \cdot 10^{-4}$
C: 1 m	10^{13}	10^{13}	400	12,4	5	1–2,5a		$-3{,}6 \cdot 10^{-5}$
H_2O: 20 cm	$5{,}3 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{14}$	1670	70	25	30d		$-4{,}7 \cdot 10^{-4}$
	$2{,}7 \cdot 10^{14}$	$1{,}2 \cdot 10^{14}$	2130	70,7	~ 10			$-1{,}4 \cdot 10^{-4}$
BeO: 7,5 cm, H_2O	$1{,}7 \cdot 10^{13}$	$2{,}5 \cdot 10^{13}$	333		10			$-1{,}7 \cdot 10^{-2}$
H_2O, C	$4 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	900	36				$-5 \cdot 10^{-5}$
H_2O, Be: 7,6 cm	$4 \cdot 10^{14}$		13600	600		10d		
H_2O	$2 \cdot 10^{13}$		~ 450					
Be	$1{,}5 \cdot 10^{14}$	$\sim 4 \cdot 10^{14}$	~ 7000	~ 200	20	var.		
C	$1{,}6 \cdot 10^{11}$					10 a		-10^{-4}
	$4 \cdot 10^{13}$ (max)		650					
	10^{14} (max)		2500		25			
	10^{14} (max)		2000					
	10^{14}							
	$5 \cdot 10^{13}$							

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	LITR	38 × 56 × 62,7 cm	Al		St, Al	1 Al-Cd Stab, 3 komb Brennst.-Cd-Stäbe
2	MTR	38 × 68,7 × 62,7 cm	Al	Al	Al, St	2 Cd-Stäbe, je 4 Elem oben Cd, unten U
3	RPT	40 cm D, 102 cm H	Al + Ni-Leg		St	1 Stahlstab, 3 B-C Stäbe
4	OMEGA	variabel	Al	Al	St	8 Regelstäbe
5	ETR	76,3 × 76,3 × 76,3 cm	Al, St	Al	St	4 schwarze, 12 grau Trimmst. 2 Regelst.
6	BMRR	38 × 38 × 61 cm	Al		Al	3 Cd-B_4C Sicherh.st. 1 Stahl-Regelstab
7	WTR	71 cm D, 91,5 cm H	Al	Al	St	9 Cd-Regelstäbe
8	AFNETR	38 × 53,3 × 61 cm	Al	Al	St	4 komb. Elemente halb U, halb Cd
9	WAR	61 × 61 × 61 cm	Al			3 Trimmst., 1 Regelstab
10	DTTR	45,7 × 53,3 × 61 cm	Al	Al	Al	5 B_4C-Stäbe
11	NACA	22,9 × 68,5 × 61 cm	Al, St		St	6 Brennst.-Cd-Stäbe
12	WWR-S	65 cm D, 50 cm H	Al		Al	1 Stahlstab 5 B_4C-Tr.Stäbe, 3 Si.Stäb
13	NMTR	25,4 × 76,2 × 61 cm	Al	Al	Al, St	6 Brennst.-Cd-Stäb
14	TRIGA	43 cm D, 36 cm H	Al	Zr H		3 B_4C-Stäbe
15	WWR-2	40 cm D, 50 cm H	Al		Al	1 Stahlstab 3 B_4C-Stäbe
16	WWR-M	54 cm D, 50 cm H	Al	Al	Al	9 Regelstäbe
17	WWR-Z	64,5 cm D, 60 cm H				9 Regelstäbe
18	HERALD					
19	DR 1					

Abschirmung	Brennstoffelemente: mittl. Wärmefluß [kcal/m²h]	Brennstoffelemente: Oberfl. Temp. [°C]	Kühlmittel: Stoff	Kühlmittel: Austrittstemp. [°C]	Kühlmittel: Druck [at]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Temp. [°C]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Druck [at]	Leistung: Wärme [MW]	Leistung: Elektr. [MW]
Beton: 3,5 m	$7{,}05 \cdot 10^4$	~ 50	H_2O	49	1			3	
Fe: 20,3 cm, Beton 2,75 m od. H_2O: 5,2 m	$1{,}09 \cdot 10^6$	< 116	H_2O	46	2,3			40	
gußeiserne Platten, H_2O: 3,5 m	$0{,}85 \cdot 10^6$	140	H_2O	55–65	6			20	
H_2O: 91,5 cm, Magnetit-Beton: 1,52 m		< 100	H_2O	~ 70	1			1,5	
Magnetit-Beton: 2,45 m	$1{,}25 \cdot 10^5$	136	H_2O	59	14			175	
Beton: 1,52 m	$3{,}15 \cdot 10^3$	68	H_2O Luft	49	1,62			1	
Beton: 2,6 m	$3{,}42 \cdot 10^5$	132	H_2O	54 29	1			20	
Baryt-Beton: 3,66 m	$1{,}63 \cdot 10^5$	82	H_2O	58	1			10	
H_2O, Beton			H_2O	43				1	
H_2O, Blei, Magn.-Beton	$2{,}4 \cdot 10^5$		H_2O	42	1,76			5	
H_2O, Baryt-Bet.: 61 cm	$1{,}33 \cdot 10^6$	~ 121	H_2O	86	8,4			bis 60	
Gusseisen, H_2O, Bi	$3{,}8 \cdot 10^5$	80	H_2O	50	1			2	
Schwerbeton: 2,6 m H_2O: 76 cm	$8{,}15 \cdot 10^5$		H_2O	46	1,76			20	
H_2O, Erde			H_2O					0,01 – 0,03	
Fe-Platte, H_2O		85	H_2O	~ 30	1			3	
H_2O, Fe, Beton		95		45				10	
	$4{,}8 \cdot 10^5$	92		31,5				10	
								5	
H_2O, C		H_2O						5	

III. **Druckwasserreaktoren**, Moderator H_2O, thermisch, heterogen

	Bezeichnung		Ort	erstmals kritisch
1	S 1 W, S 2 W – früher STR MARK I, II Submarine Thermal Reactor		1. Idaho, USA 2. USS Nautilus	31. März 53 15. Febr. 54
2	APPR	Army Package Power Reactor	Fort Belvoir, USA	8. April 57
3	PWR	Pressurized Water Reactor	Shippingport, USA	2. Dez. 57
4	BR 2	Belgian Thermal Reactor	Mol, Belgien	1959
5	DOMINIC	Dominican. Republic Reactor	Ciudad Trujillo, Dominic. Republ.	
6	INDIAN POINT	Consolid. Edison React. (mit Öl-Überhitzung)	Buchanan, USA	1960
7	UFR	University of Florida Reactor	Gainesville, USA	1959
8	S3W	– früher SFR Submarine Fleet Reactor	SSN 578, 579, 583, 584, SSG(N) 587, USA	
9	YANKEE	Atomic Electric Co.	Rowe, USA	1960
10	NS. SAVANNAH Schiffsreaktor			1960

IV. **Siedewasserreaktoren**, Moderator H_2O, thermisch, heterogen

1	BORAX-I	Boiling React. Exper. (abgebaut 1954)	Arco, USA	Sommer 53
2	BORAX-II	(modifiz. zu Borax III abgebaut 1955)	Arco, USA	19. Okt. 54
3	BORAX-III	(Betrieb eingest. April 1956, modifiziert zu Borax IV)	Arco, USA	5. Juni 55
4	SPERT-1	Special Power Excursion Reactor Tests	Arco, USA	11. Juli 55
5	EBWR	Experimental Boiling Water Reactor	Lemont, USA	1. Dez. 56
6	VBWR	Vallecitos Boiling Water Reactor	Vallecitos, USA	3. August 57
7	BORAX-IV	wie Borax III mit erneuertem Kern	Arco, USA	1957
8	ALPR	Argonne Low Power Reactor	Arco, USA	1960
9	DRESDEN	Nuclear Power Station	Grundy County, USA	1959
10	ARBOR	Argonne Boiling Reac. Fac.	Arco, USA	1960
11	KAHL	Versuchsatomkraftwerk Kahl	Kahl, Deutschland	1960

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills/kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
USAEC, US Navy	West-Bettis, ANL	S	20 27			
USAEC	Alco	E	3,5			1,25
USAEC, Duquesne	West-Bettis	E	107	240	64	40
Electronucleaire	West-CAPA	E				
Corp. Dominicana de Electricidad	Martin	E				
Consol. Edison	Consol. Edison	E	70	233	9	
Univ. Florida	West-CAPA	L, F, U	2,6			
US Navy	West-Bettis	S	6			
YAE	West-CAPA	E	55	260		

USAEC, ANL	ANL	V				
USAEC, ANL	ANL	L				
USAEC, ANL	ANL	L	0,55	239	30–35	
USAEC		F				
ANL	ANL	E	5,89	230		
GE, Pacific Gas-Electric	GE	F, L	3–4	150		
USAEC, ANL	ANL	E				
AEC, ANL	ANL	E				
Commonwealth Edison	GE	E	45			
AEC, ANL	ANL	L	8,5			
Rhein. Westfäl. El. Versorgung	AEG – GE	E				

III. **Druckwasserreaktoren,** Moderator H_2O, thermisch, heterogen 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung D = Durchmesser L = Länge	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235	Brutmantel
1	S1W, S2W	hochang. U				
2	APPR	hochang. UO_2 Dispersion	45 Elem. 7,5 × 7,5 × 90 cm + UO_2 Platten	22,5	8	nat. U
3	PWR	nat. U + hoch-anger. Uran	nat. U-Stäbe, anger. UO_2-Zr Platten	75 + 15 t n. U	28,7	
4	BR 2	4%ang.U-Oxyd	32 Stäbe, 9 mm D	80		
5	DOMINIC	geringe Anreich. U-235				
6	INDIAN POINT	90% U-235	120 Elem. 14,2 × 14,2 × 260cm	500	260	Th
7	UFR	anger. UO_2	40 Elemente cm 7 × 7 × 56			
8	S3W	hochang. U				
9	YANKEE	3,1% UO_2	St.-Rohre mit UO_2-Tabletten			
10	SAVANN.					

IV. **Siedewasserreaktoren,** Moderator H_2O, thermisch, heterogen 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung	insgesamt	kritisch	Brutmantel
1	BORAX-I	90% U-235	28 MTR-Elemente mit 18 Platt. 7,6 × 7,6 cm	3,9		
2	BORAX-II	90% U-235	67 MTR-Elemente mit 10 Platten	6,25		
3	BORAX-III	90% U-235	87 Elem. mit 24 Platt. 9,7 × 9,7 × 66 cm	13,8		
4	SPERT-1	anger. U	28 Elemente 7,5 × 7,6 × 83 cm	4,7	3,86	
5	EBWR	nat. U + 1,44% U-235	112 Elemente mit 6 Pl. 9,2 × 131 cm	76,4 + 5,6 tn.U	76,4	
6	VBWR	> 90 % UO_2	MTR-Typ: Platten mit Stahlhülle	19,8	9	
7	BORAX-IV		U- und Th-Oxyd			
8	ALPR					
9	DRESDEN	1,5% UO_2	Stäbe 1,2 cm D 264 cm L			
10	ARBOR	90% U		110		
11	KAHL	2,3 – 2,6 % UO_2	Stäbe			

Reflektor	Neutronenfluß thermisch n/cm²s	Neutronenfluß schnell n/cm²s	Spezifische Leistung [kW/kg]	Leistungsdichte [kW/l]	Abbrand [%]	Lebensdauer der Brennstoffelem.	Konversionsgrad	Temperatur-Koeffizient [°C⁻¹]
H_2O								
H_2O	$2{,}7 \cdot 10^{13}$		444	~70	33	1,5a	0,8	$-2 \cdot 10^{-4}$
H_2O	*) $4 \cdot 10^{13}$ $6 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$ $2 \cdot 10^{14}$	1000	120–277		1 a 0,5a		$-3{,}1 \cdot 10^{-4}$
H_2O	$\sim 1{,}8 \cdot 10^{13}$		540	~58		290d		$-4{,}9 \cdot 10^{-4}$
H_2O, Stahl								
H_2O	$2{,}3 \cdot 10^{13}$	$1{,}75 \cdot 10^{14}$	1820 Anf.wert	100	57	616	0,53	$-8 \cdot 10^{-4}$
H_2O	$1 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$		70				
H_2O								
H_2O	$2 \cdot 10^{13}$	$1{,}4 \cdot 10^{14}$	700		40	1,5 a		

*) obere Zahl: nat. U-Zone   untere Zahl: anger. U-Zone

H_2O	10^{13}		31	10				$-2{,}6 \cdot 10^{-5}$
H_2O	$3{,}5 \cdot 10^{13}$		1020	23				$-7{,}1 \cdot 10^{-4}$
H_2O	$3 \cdot 10^{13}$		870	20				$-5{,}2 \cdot 10^{-5}$
H_2O								$-1{,}4 \cdot 10^{-4}$
H_2O	10^{13}	$3{,}5 \cdot 10^{13}$	270	15	1		0,7	$-1 \cdot 10^{-4}$
H_2O	$2{,}8 \cdot 10^{13}$		1000				0	
H_2O				53		0,5 a	0,6	
H_2O								
H_2O	$2 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{13}$		23,7				$-2{,}88 \cdot 10^{-4}$

III. **Druckwasserreaktoren,** Moderator H_2O, thermicsh, heterogen 2. Forts.

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	S1W, S2W		Zr	Zr	St	
2	APPR	56 cm D, 56 cm H	St	St	St	7 Stäbe (B-Absorber)
3	PWR	183 cm D, 183 cm H	Zr-Leg.	Zr	St	32 x-förmige Hf-St.
4	BR 2	86 cm D, 127 cm H	Zr, St		St	12 Stäbe
5	DOMINIC					Stäbe
6	INDIAN POINT	183 cm D, 183 cm H	Zr-Leg. St	Zr-Leg Th	St	21 Stäbe (1,2% B-Stahl)
7	UFR	51 × 51 × 56 cm	St	St	St	5 Stäbe
8	S3W		Zr-Leg.		St	9 Stäbe
9	YANKEE	190 cm D; 250 cm H	St		St	Stäbe + flüss. Gift
10	SAVANN.					

IV. **Siedewasserreaktoren,** Moderator H_2O, thermisch, heterogen 2. Forts.

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	BORAX-I	50 cm D, 60 cm H	Al	Al	St	Cd-Stäbe
2	BORAX-II	65,5 × 70,4 cm, 61 cm H	Al, St	Al	St	Cd-Platten
3	BORAX-III	108 cm D, 65,5 cm H quadrat. Gitter	Al, St	Al	St	B-Hf-Stäbe
4	SPERT-1			Al		4 Cd-Platten 1 Stab
5	EBWR	121 cm D, 121 cm H	Zirc-aloy	Zr Nb	div.	5 Hf-Regelstäbe 4 Borstahl Sicherh.
6	VBWR	41,5 cm D, 94 cm H	St	St		B_4C-Platten
7	BORAX-IV					
8	ALPR					
9	DRESDEN	274 cm D, 274 cm H	Zirc-aloy			80 Cd-Platten
10	ARBOR					
11	KAHL	142 cm D, 151 cm H	Zirc-aloy		St	21 B-St-Platten

Abschirmung	Brennstoffelemente		Kühlmittel			Arbeitsmedium (meist Dampf)		Leistung	
	mittl. Wärmefluß [kcal/m²h]	Oberfl.-temp. [°C]	Stoff	Austritts-temp. [°C]	Druck [at]	Temp. [°C]	Druck [at]	Wärme [MW]	Elektr. [MW]
			H_2O	246	140	246	15,1		
Fe: 5 cm, H_2O: 110 cm, Beton	$1{,}49 \cdot 10^5$	254	H_2O	232	85	208	14	10	2,035
St, Beton	$3 \cdot 10^5$	333 (max)	H_2O	283	140	252	42	260	60 bis 100
H_2O, Beton	$2{,}6 \cdot 10^5$	276	H_2O	370	140	244	36,5	43	11,5
			H_2O	277	140	231	29	59	12,5
St, H_2O, Beton	$3 \cdot 10^5$		H_2O Ölüberhitzung:	266	105	232 538	29,5 26	500 177	140 96
Fe, H_2O, Beton		<297	H_2O	232	85	208	14	10	2
H_2O, Pb, Polyäthylen			H_2O		140		30–21		
Fe, H_2O, Beton	$2{,}71 \cdot 10^5$	336	H_2O	273	140	243	36,4	480	134
								74	16

Abschirmung	mittl. Wärmefluß [kcal/m²h]	Oberfl.-temp. [°C]	Stoff	Austritts-temp. [°C]	Druck [at]	Temp. [°C]	Druck [at]	Wärme [MW]	Elektr. [MW]
seitl. Erde: 60–335 cm oberh. H_2O: 90–135 cm			H_2O	177	10,1	177	10,1	1,2	
Beton: 90–210 cm	10^5	223	H_2O	215	22,2	215	22,2	6,4	
Beton: 90–210 cm oberhalb H_2O: 120 cm	$1{,}82 \cdot 10^5$	223	H_2O	215	22,2	215	22,2	12	2,3
Erde, oberhalb Eisen			H_2O		1			bis 0,51	
Stahl: 2 cm, Pb: 7,6 cm Beton: 1,2–2,3 m	$1{,}19 \cdot 10^5$	257	H_2O	253	43	253	43	20-62	5
Beton	$2 \cdot 10^5$		H_2O	286	70	286	70	20-40	5
	$2{,}71 \cdot 10^5$		H_2O	283	71			627	180
			H_2O	335	140			200	
Beton, Fe	$2{,}3 \cdot 10^5$	294	H_2O	285	71	285	71	55,5	15

V. **Homogene Reaktoren** (H_2O), Moderator H_2O, thermisch, homogen

	Bezeichnung		Ort	erstmals kritisch
1	LOPO	Low Power Water Boiler (1944 mod. zu HYPO)	Los Alamos, USA	Mai 44
2	HYPO	High Power Water Boiler (modifiziert zu SUPO)	Los Alamos, USA	Dez. 44
3	SUPO	Super Power Water Boiler	Los Alamos, USA	Febr. 50
4	HRE-1	Homogeneous Reactor-Exper. (abgeb. 1954)	Oak Ridge, USA	15. Apr. 52
5	WBNS	Water Boiler Neutron Source	Santa Susana, USA	Apr. 52
6	NCSR-I	North Carolina State Reactor I (auch RRR)	Raleigh, USA	5. Sept. 53
7	NCSR-II	North Carolina State Reactor II (ersetzt 6)	Raleigh, USA	1957
8	LIWB	Livermore Res. Reactor (auch WBNS od. L-3)	Livermore, USA	5. Nov. 53
9	ARF	Armour Research Foundation	Chicago, USA	24. Juni 56
10	LAPRE-1	Los Alamos Power Reac. Exper. 1 (abgeb. 1957)	Los Alamos, USA	Okt. 56
11	LAPRE-2	Los Alamos Power Reac. Experiment 2	Los Alamos, USA	1957
12	KEWB-1	Kinetic Experiment on Water Reactors	Santa Susana, USA	1956
13	RRJ	Research React. for Jap. (wie 14) (a. NAA L-54)	Tokai Mura, Japan	Aug. 57
14	FRF	Forschungsreaktor Frankfurt/M. (wie 13)	Frankfurt/Main,	Jan. 58
15	MRR	Medical Research Reactor	Los Angeles, USA	
16	ZETR	Zero Energy Therm. R. (s. VI. 2)	Harwell, Engl.	Jan. 56
17	HSRN	Homogeneous Suspension Reactor Netherland	Holland	
18	FRB	Forschungsreaktor Berlin (wie 14)	Berlin, Deutschl.	1958
19	DR 1	Danish Reactor 1	Risö, Dänemark	15. Aug. 57
20	KEWB-2	Kinetic Experiment on Water Boilers	Santa Susana, USA	1958

VI. **Homogene Reaktoren** (D_2O), Moderator D_2O, thermisch, homogen

	Bezeichnung		Ort	erstmals kritisch
1	HRE-2	Homogeneous Reactor Exp.-2 (auch HRT-1)	Oak Ridge, USA	Jan. 57
2	ZETR	Zero Energy Thermal Reac. (s. V. 16)	Harwell, Engl.	Jan. 56

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills/kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
USAEC, LASL	LASL	F	0,5	(einschl. Gebäude für LOPO, HYPO und SUPO)		
USAEC, LASL	LASL	F				
USAEC, LASL	LASL	F	0,2			
USAEC, ORNL	ORNL	F	1,1			
USAEC, NAA	NAA	F	0,075 –0,1			
North Carolina State College	NCSC	F	0,6			
North Carolina State College	NCSC	F	0,35			
USAEC	NAA	F				
Armour Research Foundation	NAA	F	0,7			
USAEC, LASL	LASL	L	0,7			
USAEC, LASL	LASL	L	0,1			
USAEC	NAA	F				
Japan Atomic Energy Institute	NAA	F				
Land Hessen Univ. Frankfurt	NAA	F	0,9			
	NAA	F				
UKAEA	AERE	F				
		L				
Stadt Berlin	NAA	F				
	NAA	F				
	NAA	F				

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills/kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
USAEC, ORNL	ORNL	F	3,8	660		
UKAEA	AERE	F				

V. **Homogene Reaktoren** (H_2O), Moderator H_2O, thermisch, homogen 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	LOPO	UO_2SO_4 14,7% U-235	Lösung in rostfreiem Stahlbehälter	0,58	0,566	
2	HYPO	$UO_2(NO_3)_2$ 14,5% U-235	,,	0,87	0,808 (bei 14%)	
3	SUPO	$UO_2(NO_3)_2$ 88,7% U-235	,,	0,87	0,777	
4	HRE-1	UO_2SO_4 90% U-235	,,	2,7–3,6	1,6–2,11	
5	WBNS	$UO_2(NO_3)_2$ 90% U-235	,,	0,6382	0,6339	
6	NCSR-I	UO_2SO_4 90% U-235	,,	0,848	0,79	
7	NCSR-II	UO_2SO_4 >90% U-235	,,	1,15		
8	LIWB	UO_2SO_4 > 90% U-235	,,	0,694	0,687	
9	ARF	UO_2SO_4 88% U-235	,,	1,3	1,2	
10	LAPRE-1	$UO_3+H_3PO_4$ 90% U-235	Lösung in Au plattiert. Stahlbehälter	9	4,2	
11	LAPRE-2	$UO_3+H_3PO_4$ 90% U-235	,,	4	3,8	
12	KEWB-1					
13	RRJ	UO_2SO_4 20% U-235	Lösung in rostfreiem Stahlbehälter	1,6	1,17	
14	FRF	UO_2SO_4 20% U-235	,,	1,6	1,22	
15	MRR	UO_2SO_4 hochanger.	,,	0,925	0,85	
16	ZETR	bisher U-235 u. Pu-Lös.				
17	HSRN	UO_2 angereichert	UO_2 in H_2O suspend., in rostfr. Stahlbehäl.			
18	FRB	UO_2SO_4 20% U-235	Lösung in rostfreiem Stahlbehälter	1,6		
19	DR-1	UO_2SO_4 20% U-235	,,			
20	KEWB-2					

VI. **Homogene Reaktoren** (D_2O), Moderator D_2O, thermisch, homogen 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	HRE-2		UO_2SO_4-Lös. i. D_2O. Zirc-Beh. (W-stärke: 9,5mm)	5	1,84	
2	ZETR	bish. U-235 u. Pu-Lösungen				

Reflektor	Neutronenfluß		Spezifische Leistung [kW/kg]	Leistungsdichte [kW/l]	Abbrand [%]	Konversions-grad	Temperatur-Koeffizient [°C⁻¹]
	thermisch n/cm² s	schnell n/cm² s					
eO: 30 cm nten C: 30 cm	$2 \cdot 10^{6}$ (Mittel)		$8{,}8 \cdot 10^{-5}$				$-6{,}2 \cdot 10^{-3}$ (39° C)
eO: 15 cm : 30 – 50 cm	$3 \cdot 10^{11}$		6,8	0,37			$-2 \cdot 10^{-4}$
: 53 cm	$1{,}7 \cdot 10^{12}$ (max)	$1{,}9 \cdot 10^{12}$ (max ge.)	58	2,8			$-2{,}9 \cdot 10^{-4}$
$_2$O: 25 cm	$1{,}9 \cdot 10^{13}$	$3{,}7 \cdot 10^{13}$	500	20			$-2 \cdot 10^{-3}$
: 127 cm D 51 cm H	$8 \cdot 10^{7}$	$5 \cdot 10^{8}$	$7{,}9 \cdot 10^{-3}$				$-2{,}9 \cdot 10^{-4}$
: 51 cm	$5 \cdot 10^{11}$		12,6				$-8{,}2 \cdot 10^{-4}$
: 51 cm	$8{,}6 \cdot 10^{11}$ (gesch.)		25	1,43			$-2 \cdot 10^{-4}$
: 60 cm	$2 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	0,72	0,035			$-2{,}6 \cdot 10^{-4}$
: 76 cm	$2 \cdot 10^{12}$		40	3,8			$-3 \cdot 10^{-4}$
tahl + H_2O: 91 cm	$2 \cdot 10^{13}$	$1{,}4 \cdot 10^{14}$	470	46			$-7 \cdot 10^{-4}$
: 28 cm	$1{,}8 \cdot 10^{13}$ (max)	$9{,}5 \cdot 10^{13}$ (max)	350	16			$-4 \cdot 10^{-4}$
C							
: 30 cm	10^{12} (Mittel)	$3 \cdot 10^{12}$ (Mittel)	31	1,8			$-3 \cdot 10^{-2}$
: 30 cm	10^{12} (Mittel)	$3 \cdot 10^{12}$ (Mittel)	31	1,8			$-3 \cdot 10^{-2}$
: 60 cm	$1{,}7 \cdot 10^{12}$ (max)		55	2,8 – 5,5			$-2{,}9 \cdot 10^{-4}$
BeO	10^{13}						
C	10^{12}	$2 \cdot 10^{12}$					
D_2O: 35,5 cm	$7 \cdot 10^{13}$	10^{14}	1000	17			$-2 \cdot 10^{2}$

V. **Homogene Reaktoren** (H_2O), Moderator H_2O, thermisch, homogen 2. Forts

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Lösungs-mittel	Reaktorgefäß	Steuerung
1	LOPO	Kugel, 31 cm D		H_2O	St	1 Messingst. m. Cd 1 Sicherheitsstab
2	HYPO	Kugel, 31 cm D		H_2O	St	2 Cd-Regelplatten 1 Tr.stab, 1 Sich.st.
3	SUPO	Kugel, 31 cm D		H_2O	St	3 Cd-Platt., tangie 2 B^{10}-Stäbe
4	HRE-1	Kugel, 46 cm D		H_2O	St	Br.stoffkonz., Refl. spiegel, Borplatten
5	WBNS	Kugel, 31 cm D		H_2O		2 B-Sicherheitsst. 2 Cd-Regelstäbe
6	NCSR-I	Zylinder, 27 cm D 13–14 l Lösung		H_2O		2 B-Stäbe 2 Cd-Trimmstäbe
7	NCSR-II	Zylinder, 21 cm D 30 cm H		H_2O	St	2 B_4C-Stäbe 2 Cd-Trimmstäbe
8	LIWB	Kugel, 32 cm D 14,5 l Lösung		H_2O	St	4 B_4C-Stäbe tangierend
9	ARF	Kugel, 32 cm D		H_2O	St	4 B_4C-Stäbe
10	LAPRE-1	Zylinder, 38 cm D 41 cm H		H_2O H_3PO_4	St	5 B^{10}-Regel- stäbe
11	LAPRE-2	Zylinder, 38 cm D 61 cm H		H_2O H_3PO_4	St	6 C-Reflektorteile +Lösungsspiegel
12	KEWB-1	Kugel				
13	RRJ	Kugel, 40 cm D		H_2O	St	4 B_4C-Stäbe
14	FRF	Kugel, 40 cm D		H_2O	St	4 B_4C-Stäbe
15	MRR	Kugel, 32 cm D		H_2O	St	4 B_4C-Stäbe
16	ZETR			H_2O		
17	HSRN			H_2O		
18	FRB	Kugel, 40 cm D		H_2O		4 B_4C-Stäbe
19	DR-1			H_2O		
20	KEWB-2					

VI. **Homogene Reaktoren** (D_2O), Moderator D_2O, thermisch, homogen 2. Forts.

1	HRE-2	Kugel 80 cm D 2290 Liter		D_2O	Zirca- loy	Brennstoffkonzentr. Temperaturkoeffi.
2	ZETR			D_2O		

Abschirmung	mittl. Lösungs-temperatur [°C]	Kühlmittel			Arbeits-medium (meist Dampf)		Leistung	
		Stoff	Austritts-temp. [°C]	Druck [at]	Temp. [°C]	Druck [at]	Wärme [MW]	Elektr. [MW]
Beton	39						0,05 W	
Pb: 10 cm, Cd: 0,8 mm Beton: 1,5 m	85	H_2O					5,5 kW	
B_4C, Paraffin Stahl	85	H_2O	60				0,045	
Stahl + Beton: > 2,1 m	250 (b. 70 at)	Lös.	250	70	195	14	1,6	0,15
Beton: 60 cm							5 W	
Pb: 10–15 cm Baryt-beton: 1,8 m	80 (max)	H_2O					0,07	
Pb: 10 cm Schwerbeton: 1,8 m		H_2O	27	1			0,02	
Cd: 0,76 mm, Pb: 12,5 cm seit. Beton: 0.9m ob. Holz		H_2O	16	1			500W	
Schwerbeton: 1,5 m			Umg.	4,6			0,05	
H_2O: 1,2 m; Pb: 20 cm Beton: 1,5 m		H_2O					2	
Beton	315	H_2O	315	56	255	42	0,8–1	
Beton		H_2O						
Beton: 1,5 m		H_2O	43	1,4			0,05	
Schwerbeton		H_2O					0,05	
Beton: 1,5 m		H_2O					0,05	
		H_2O						
		Susp.	250	53			0,25	
Schwerbeton		H_2O						
							5 W	
Stahl, Barytbeton: > 2,1 m	280	Lösg.	300	120	244	36,5	5,22	0,3

VII. **Heterogene Schwerwasserreaktoren,** thermisch

	Bezeichnung		Ort	erstmals kritisch
1	CP-3	Chicago Pile 3 (modifiziert zu CP3' Jan. 1950)	Lemont, USA	15. Mai 44
2	ZEEP	Zero Energy Exp. Pile, Canada	Chalk River, Kanada	5. Sept. 45
3	NRX	National Research Exper.	Chalk River, Kanada	22. Juli 47
4	ZOE	Zéro Energie Oxyde d'Uranium et Eau Lourde (modif. EL 1)	Fontenay aux Roses Frankr. (bei Paris)	15. Dez. 48
5	TR	Sowjetischer Schwerwasser-reaktor umgebaut 1957	Therm. Elektr. Labor, UdSSR	April 49
6	CP-3'	Chikago Pile 3' abgstellt Mai 54, abgebaut 55–56	Lemont, USA	22. Juli 50
7	JEEP	Joint Establishment Experimental Pile	Kjeller, Norwegen	30. Juli 51
8	EL-2	Eau Lourde 2 (P2)	Saclay, Frankreich	27. Okt. 52
9	PDP	Process Development Pile	Savannah River, USA	1953
10	CP-5	Chicago Pile-5	Lemont, USA	10. Febr. 54
11	SAVANNAH-	Savannah River (5 Reaktoren)	Aiken County USA	1954–1955
12	SLEEP	Swedish Low Energy Exp. Pile (R 1 Sweden)	Stockholm, Schweden	13. Juli 54
13	DIMPLE		Harwell, England	Aug. 54
14	DIDO	(früh. E 443), PLUTO (wie DIDO nur versch. Experiment.einricht.) DMTR	Harwell, England Dounreay	5. 56, 10. 57 Mai 58
15	NRU	Canada	Chalk River, Kan.	3. Febr, 57
16	EL-3	Eau Lourde 3, Saclay's MTR	Saclay, Frankr.	4. Juli 57
17	HAL-DEN	Exp. Power Reactor,	Halden, Norwegen	
18	MIT	Mass. Inst. of Technology Reactor	Cambridge, USA	
19	ISPRA-1	CP-5 Typ	Ispra, Italien	
20	HIFAR	High Flux Australian Res. Reactor	Lucas Heigh, Australien	
21	DIORIT		Würenlingen, Schweiz	
22	CIR	Canada-India Reactor	Trombay, Indien	1958
23	FR-2	Forschungsreaktor 2 Karlsruhe	Karlsruhe Deutschland	1959
24	DR 3	Danish Reactor 3	Risö, Dänemark	1958
25	NPD 2	Nuclear Power Demonstration 2	Des Joachims Kanada	1961

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills/kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
JSAEC, ANL	Met. Lab.	F	2			
ECL	AECL	F	0,2			
ECL	AECL	F	10			
EA	CEA	F				
dW-UdSSR		F. I				
JSAEC, ANL	ANL	F	2			
nstitut for Atomenergi	IFA, Chr. Michelson Inst.	F	2			
EA	CEA	F	10^9 ffrs			
USAEC	Du Pont	F				
USAEC, ANL	ANL	F	2,25			
USAEC	ANL, Du Pont	B	1000(?)			
AB-Atomenergi	AB-Atomenergi	F				
UKAEA	AERE	F	0,1			
UKAEA	AERE	F	5			
AECL	AECL	F, B	50			
CEA	CEA	F				
IFA	IFA, CMI	W	3,5			
Mass. Inst. of Technology	MIT	F	2,5			
CNRN	ACF	F	> 1			
Australien AEC	AERE	F	5			
Reactor Ltd.	Reactor Ltd.	F	4			
AEC of India	AECL	F	14–15			
Reaktor-Bau u. Betriebs-GmbH	Reaktor-Bau u. Betriebs-GmbH	F	5,2			
AECL	CAN. G. E.	L, E				

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung D = Durchmesser L = Länge	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	CP-3	nat. U	120 (136) Stäbe, 2,8 cm D,	3 t nat. U		
2	ZEEP	nat. U, variabel	Variable Z. v. Al-Röhr. (2,74 mL) m. U-Bolz. (3,25 cm D)	variabel	var.	
3	NRX	nat. U	175 Stäbe 3,45 cm D, 3,1 m L	10,5 t nat. U	8 t nat. U	bis 90 Th-St.
4	ZOE	nat. UO_2, U	Urspr. 69 Al-Rohre m. UO_2-Tabl., seit 1954 U-Stäbe	2,07 t nat. U		
5	TR	2% U-235		270		
6	CP-3′	90% U-235	122 Stäbe 2% U-Al-Legier. 2,16 cm D, 1,68 m L	4,2	3,8	
7	JEEP	nat. U	128 Stäbe 2,5 cm D, 1,9 m L	2,4 t nat. U		
8	EL-2	nat. U	Al-Rohre m. U-Bolzen	3 t nat. U		
9	PDP					
10	CP-5	90% U-235	12 MTR-Typ-El. mit 10 Platten (17 möglich)	1,68 (b. 12 El)	1,15	
11	SAVAN.					
12	SLEEP	nat. U	126 Stäbe 2,9 cm D	3 t nat. U		
13	DIMPLE	variabel	variabel	variabel		
14	DIDO PLUTO	hochanger. U	25 MTR-Typ	2,5	1	
15	NRU	nat. U	200 Stäbe aus nat. U	12 t nat. U	3,2 t nat. U	bis 90 Th.St.
16	EL-3	1,4% U-235		7		
17	HALDEN	nat. U		7 t nat. U		
18	MIT	90% U-235	19 MTR-Typ	2	1,45	
19	ISPRA-1	20% U-235	15 MTR-Typ zu 17 Platten + 2 brennstofflose Platten		2,2	
20	HIFAR	hochanger. U	25 MTR-Typ	2,5	1	
21	DIORIT	nat. U	244 Stäbe	6 t nat. U		
22	CIR	nat. U	175–190 Stäbe 3,45 cm D, 3,13 m L	10,5 t nat. U	8 t nat U	bis 90 Th-St.
23	FR-2	nat. U	158 St. 3,2 cm D, 2,16 m L	nat U 5 t		Th.-St.
24	DR 3					
25	NPD 2	nat. UO_2	1188 Bündel uz 7 Stäben 50 cm L	15,8		

Reflektor	Neutronenfluß thermisch $n/cm^2 s$	Neutronenfluß schnell $n/cm^2 s$	Spezifische Leistung [kW/kg]	Leistungsdichte [kW/l]	Abbrand [%]	Lebensdauer der Brennstoffelemente	Konversionsgrad	Temperatur-Koeffizient [°C⁻¹]
C: 61 cm D_2O: 45 cm	$3 \cdot 10^{12}$		0,11					
C: 91 cm	10^{8}		variabel	variabel			variabel	
C: 84 cm Th: 6 cm	$6,8 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	4,2	1,8			0,73	
D_2O, C	$3 \cdot 10^{10}$ (b. 10kW)							
D_2O, C: 1 m	$2,5 \cdot 10^{12}$ (max)					1,5–2 a		
C: 61 cm, darüber D_2O:61cm	$4 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{11}$	168 (max)	0,12 (max)				$-5 \cdot 10^{-4}$
C: 70 cm	$2,5 \cdot 10^{12}$		50	0,13			0,75	$-2,5 \cdot 10^{-4}$
C: 90 cm	$5 \cdot 10^{12}$ (b. 1,5 MW)							$-1,25 \cdot 10^{-5}$
C: 61 cm D_2O: 61 cm	$2,8 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{13}$		870		0,75a	0,1	
C: 90 cm	$3 \cdot 10^{11}$	10^{11}						$-1,5 \cdot 10^{-4}$
C: 91 cm								
C: 60 cm	10^{14} (max)	$1,3 \cdot 10^{14}$ (max)						
H_2O: 30 cm	$3 \cdot 10^{14}$	$2,3 \cdot 10^{14}$	18	9				
	10^{14}			5				
	$3 \cdot 10^{13}$		410	14			0,75	
D_2O: 21 cm C: 61 cm	$1,75 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	556	5,6	20			$-4 \cdot 10^{-4}$
D_2O: 21 cm C: 61 cm	$9,6 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{14}$	2273	17	20			
D_2O: 10 cm C: 60 cm	10^{14} (max)	$1,3 \cdot 10^{14}$ (max)						
C: 71 cm	$2 \cdot 10^{13}$							
C: 84 cm	$6,8 \cdot 10^{13}$		4,2	1,8			0,73	
D_2O	$7,5 \cdot 10^{12}$ max $3 \cdot 10^{13}$	10^{13}	2,4	0,68				
D_2O, C								
D_2O, H_2O	$2,6 \cdot 10^{13}$		5,2		67			

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	CP-3	1,83 mD, 1,83 m H	Al			4 Cd-Al-Platten (Signalarm-typ) 3 Trimmstäbe
2	ZEEP	2,03 m D. 2,59 m H	Al	St		4 Cd- Stahlplatten 8 Stäbe
3	NRX	2,67 m D, 3,13 m H	Al		Al	1 Regelstab 6 B_4C-Abschaltstäbe
4	ZOE	1,81 m D, 2,355 m H	Al			Cd-Sicherheitsstäbe Cd-Regelstäbe
5	TR	1,1 m D, 1,22 m H	Al		Al,St	4 Cd-Trimmstäbe 2 Sicherheitsstäbe
6	CP-3′	1,83 m D, 1,67 m H	Al	Al		4 Cd-Al-Platten (Signalarm-typ) 1 Regelstab
7	JEEP	1,80 m D, 1,90 mH	Al		Al	4 Cd-Platten 1 Cd-Stab
8	EL-2	2,1 m D, 2,5 m H	Al,Mg	Al,Mg	Al	4 Cd-Trimmplatten 2 B_4C-Abschaltplatten
9	PDP					
10	CP-5	61 cm D, 61 cm H	Al	Al		4 Cd-Al-Platten (Signalarm-typ) 1 Regelstab
11	SAVAN.					
12	SLEEP	1,8 m D, 2,5 m H		Al	Al, St	2 Cd-Regelplatten 2 Cd-Sicherheitsstäbe
13	DIMPLE	2,59 m D 3,05 m H	Al		Al, St	2 Reihen (10 Stäbe) Cd-Sicherh.-St. veränd. D_2O Sp
14	DIDO	Zylinder 86 cm D 60 cm H				1 Cd-Feinkontrollstab 6 Cd-Regelarme
15	NRU	3,05 m D, 3,05 m H	Al		Al	16 Cd-Stäbe
16	EL-3	3 m³				
17	HAL-DEN	2,5 m D, 2,4 m H	Al -Leg		platt. Stahl	19 Cd Stäbe
18	MIT	84 cm D, 60 cm H	Al		Al, r. St	6 Cd-Al-Stäbe 1 Regelstab
19	ISPRA-1	79 cm D, 60 cm H	Al	Al	Al	6 Cd-Stäbe
20	HIFAR	Zylinder 86 cm D, 60 cm H	Al	Al	Al, St	7 Cd-Regelstäbe
21	DIORIT	2,28 m D, 2,44 m H	Al			11 Cd-Stäbe
22	CIR	2,67 m D, 3,13 m H	Al		Al	B_4C, 6 B_4C-Stäbe D_2O-Spiegel
23	FR-2	Zylinder 3,1 m D, 2,6 m H	Al		Al	16 Cd-Trimm Abschaltstäbe 1 Regelst.absenkb.D_2O-Spie.
24	DR 3					
25	NPD 2	3,25 m D 3,84 m H	Zr		Al	Regelstäbe D_2O-Spiegel

Abschirmung	Brennstoffelemente: mittl. Wärmefluß [kcal/m²h]	Brennstoffelemente: Oberfl. Temp. [°C]	Kühlmittel: Stoff	Kühlmittel: Austritts-temp. [°C]	Kühlmittel: Druck [at]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Temp. [°C]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Druck [at]	Leistung: Wärme [MW]	Leistung: Elektr. [MW]
Pb-Cd: 10 cm, Eisenbeton: 2,4 m			D_2O	35–40				0,3	
H_2O: 91,5 cm				Umgeb.-temp.	1			3,5–30 W	
Gußeisen: 30 cm Beton: 2,1–2,4 m			H_2O	65–83	1			40	
Beton 1,5 m		115	D_2O					bis 0,15	
Beton: 2,5 m Pb, C	$2 \cdot 10^5$ (max)		D_2O		1			2,5	
Pb-Cd: 10 cm Eisenbeton: 2,4 m	$1,52 \cdot 10^4$	43	D_2O	40	1			0,3	
Beton: 2 m	$1,14 \cdot 10^4$	90	D_2O	45	1			0,35–0,8	
Gußeisen: 20 cm Beton: 2,25–2,75m		300	früher N_2 jetzt CO_2	130	8,1			2,4	
B: 6,35 mm, Pb: 8,9 cm, Bt.: 1,42 m(Mi.)			D_2O	51	1			1–4	
			H_2O						
Eisenbeton: 1,8 m Cd, Al		D_2O 5–11°C	Luft	35–45	1			0,1–0,8	
Beton: 61 cm								niedr.	
Beton: 1,52 m			D_2O					10	
Stahl: 30 cm Beton: 2,9 m	$1,35 \cdot 10^6$	93	D_2O	75	niedr.			200	
			D_2O					15	
In Felsen versenkt	$2,44 \cdot 10^5$	D_2O 11 °C	D_2O (Sieden)	230 (Dampf)	39	205	17,6	20	
Stahl, Pb, Magnetit-Beton: 1,67 m	$3,03 \cdot 10^4$	52	D_2O	40	1			1	
Schwerbeton	$1,54 \cdot 10^5$	67	D_2O	27	1			5-10	
Beton: 1,52 m			D_2O	50				10	
Fe: 17,7 cm, Beton: 2,54 m			D_2O	51,5	1			12,5	
Gußeisen: 30 cm Beton: 2,1–2,4 m	$1,63 \cdot 10^6$ (max)	108 (max)	D_2O	85	2,8			40	
Boral, Stahl, Pb, Schwerbeton: 2,5 m	$7,75 \cdot 10^5$ (max)	80	D_2O	45	1			12	
			D_2O	277	79	232	27	82,5	20

VIII. **Organisch moderierte Reaktoren,** Moderator organ. Verbindung, thermisch, heterogen und homogen

	Bezeichnung		Ort	erstmals kritisch
1	OMRE	Organic Moderated Reactor Experiment	Arco, USA	17. Sept. 57
2	AGN-201	Aerojet General Nucleonics (Serienm. hergest. Reaktor f. Unterrichtszw.)	San Ramon, USA	

IX. **Graphit Reaktoren,** thermisch, heterogen

1	CP-1	Chicago Pile-1 (1943 umgebaut in CP-2)	Chicago, USA	2. Dez. 42
2	CP-2	Chicago Pile-2 (abgebaut)	Lemont, USA	20. März 43
3	X-10	Oak Ridge X-10 Area Reac. (ORNL X-10)	Oak Ridge, USA	4. Nov. 43
4	HAN 305	Hanford-305 Test Reactor	Hanford, USA	Feb. 44
5	Hanford	(8 Reaktoren)	Hanford, USA	1944–55
6	1. SR	1. Sowjetischer Reaktor	UdSSR	
7	GLEEP	Graphite Low Energie Experimental Pile	Harwell, England	15. Aug. 47
8	BEPO	British-Exper. Pile	Harwell, England	5. Juli 48
9	Windscale	(2 Reaktoren)	Sellafield, England	Juli 50 1951
10	BNLN	Brookhaven Nat. Lab. (nat. U, später siehe 11)	Upton, USA	22. Aug. 50
11	BNLE	(10, mit angereichertem) Brennstoff	Upton, USA	1957
12	SRPT	Sowjetischer Reaktor für phys. techn. Versuche	Moskau, UdSSR	April 52
13	SA	Sowjetisches Atomkraftwerk	Obrinskoye, UdSSR	9. Mai 54
14	G-1	Französischer Brutreaktor	Marcoule, Frankr.	7. Jan. 56
15	BR-1	Belgian Reactor-1	Mol, Belgien	11. Mai 56
16	Calder Hall*) A, B (je 2 Reaktoren)		Calder Hall, Engl.	1956 – 1958
17	EDF 1	Eléctricité de France (EDF 2 wird ähnlich)	Avoine, Frankr.	1959
18	G 2 G 3	Französischer Brut- und Leistungsreaktor	Marcoule, Frankr.	21. Juli 58 1959

*) Ebensolche 4 Reaktoren befinden sich in Chapel Cross.
Verbesserte Calder Hall Reaktoren sind in Berkeley, Bradwell, Hunterston, Hinkley Point im Bau, s. Stichwort im Nachtrag.

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills/kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
USAEC, NAA	NAA	L	2,6	52 – 148		
(Weiterentwickelte Typen AGN-201-M)		U, (I)	0,08			
USAEC, Met. Lab.	Metallurg. Lab.	1.Reakt.	2,7			
USAEC, ANL	Metallurg. Lab.	F	2,0			
USAEC, ORNL	Du Pont	F, I	5,2			
USAEC		F				
USAEC	ANL	B	350(3Reaktoren)			
		F				
UKAEA	AERE	F				
UKAEA	AERE	F, I				
UKAEA	UKAEA	B				
USAEC, BNL	BNL	F	25			
USAEC, BNL	BNL	F				
AdW-UdSSR	AdW-UdSSR	F, I,				
		E				
CEA	CEA	L, B	28			
CEAN	CEAN	F				
UKAEA	UKAEA	E, B	42–56			
CEA	CEA	E (B)				
CEA	CEA	E, B	28			

VIII. **Organisch moderierte Reaktoren,** Moderator organ. Verbindung, thermisch, heterogen und homogen 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung D = Durchmesser L = Länge	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	OMRE	UO_2 hoch-anger.	25–36 MTR-Elemente mit 16 Platten	21	12	
2	AGN-201	UO_2 20% U-235	homog. Misch. UO_2-Polyäthylen (50mg U-235/cm³)		0,656	

IX. **Graphit Reaktoren,** thermisch, heterogen 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung D = Durchmesser L = Länge	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	CP-1	nat. U, UO_2, U_3O_8	2060 U-Metall Zylinder 17420 UO_2-bzw. U_3O_8-Bolz.	6,5 t n. U 40t nat. U-Oxyd	296	
2	CP-2	nat. U, UO_2, U_3O_8	17700 wie CP-1	10 t nat. U 42 t n. U-Oxyd	280	
3	X-10	nat. U	1247 Kanäle enthaltend U-Bolzen	49,2 t nat. U	30 t nat. U	
4	HAN-305	nat. U				
5	Hanford	nat. U				
6	1. SR	nat. U	U-Bdzen 3–4 cm D	45 t nat. U		
7	GLEEP	nat. U, UO_2	U-Bolzen, Al-Rohre mit UO_2-Tabletten	13 t nat. U 26 t nat. UO_2		
8	BEPO	nat. U	U-Bolzen	4 t nat. U	26 t nat. U	
9	Wind-scale	nat. U	U-Stäbe in Al Röhren			
10	BNLN	nat. U	1350 Al-Rohre mit je 33 U-Bolzen	60 t nat. U	30 t nat. U	
11	BNLE	90% U-235	5000 Elemente mit 3 U-Platten	57		
12	SRPT	15% U-235 (variabel)	37 Elemente,			
13	SA	5% U-235	128 Elemente	27,5	13	
14	G-1	nat. U	Stäbe (3,8 m L) mit insges. 2674 U-Bolz.	100 t nat. U	20 t nat. U	
15	BR-1	nat. U	11500 U-Bolzen	23 t nat. U	18 t nat. U	
16	Calder Hall	nat. U	169 Gruppen mit je 6 Stäb.	130 t nat. U		
17	EDF	nat. U	~ 1000 Stäbe	100–150 t nat. U		
18	G-2 G-3	nat. U	U-Bolzen	100 t nat. U		

Reflektor	Neutronenfluß thermisch n/cm²s	Neutronenfluß schnell n/cm²s	Spezifische Leistung [kW/kg.]	Leistungsdichte [kW/l]	Abbrand [%]	Lebensdauer d. Brennstoff-elemente	Konversions-grad	Temperatur-Koeffizient [°C⁻¹]
Polyphe-nyl: 20 cm C: 20 cm	$5{,}44 \cdot 10^{13}$ $2{,}5 \cdot 10^{8}$ (bei 5W)	$2{,}36 \cdot 10^{14}$	776 (Mittel)		11,2		0	$-1{,}3 \cdot 10^{-4}$ (variabel) $-2{,}5 \cdot 10^{-4}$
C: 30 cm	$4 \cdot 10^{6}$		$6{,}8 \cdot 10^{-4}$	$10{,}7 \cdot 10^{-6}$				$-1 \cdot 10^{-4}$
C: 30 cm	$1 \cdot 10^{8}$		$3{,}6 \cdot 10^{-2}$	$6{,}4 \cdot 10^{-4}$				$-1 \cdot 10^{-4}$
C: 81 cm	$1{,}1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$	10 (mitt.)	$1{,}9 \cdot 10^{-3}$ (mittel)				$2{,}86 \cdot 10^{-5}$
C								
C								
C: 61 cm	$3{,}7 \cdot 10^{10}$							U $-2{,}3 \cdot 10^{-5}$ C $-2{,}7 \cdot 10^{-5}$
C: 91,5 cm	$2 \cdot 10^{12}$		33					U $-1 \cdot 10^{-5}$ C $-1{,}2 \cdot 10^{-5}$
C								
C: 1,17 m			70 (mitt.)	0,13 (mittel)			0,8	$-3{,}9 \cdot 10^{-5}$
C: 1,37 m			350 (mitt.)	0,17 (mittel)	40		0	$-9 \cdot 10^{-5}$
C: 60 bis 80 cm				1,27				$-6 \cdot 10^{-5}$ (Raumtem.)
C: 75 cm			1100	10	15		0,32	
C: 66 cm			133				jährl. 15 kg Pu	
C: 90 bis 110 cm	10^{12}	$1{,}23 \cdot 10^{12}$	0,11	0,031				U $-1{,}6 \cdot 10^{-5}$ C $-1{,}25 \cdot 10^{-5}$
C: 90 cm								
C								
C: 50 cm	$2{,}5 \cdot 10^{13}$							

VIII. **Organisch moderierte Reaktoren,** Moderator organ. Substanz, thermisch heterogen und homogen 2. Forts.

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	OMRE	57 × 57 × 92 cm	St	St	Stahl	12 B_4C-Stäbe
2	AGN-201	Zylinder 25 cm D, 24 cm H				Brennstoffstäbe

IX. **Graphit Reaktoren,** thermisch, heterogen 2. Forts.

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	CP-1	abgefl. Rotationsellips. Rad. 3,09 u. 3,88 m	C			1 B- u. 2 Cd-Stäbe
2	CP-2	6,1 × 5,5 × 5,2 m³, quadr. Gitter	C			6 Cd-St-Stäbe 6 Regelstäbe
3	X-10	5,64 × 5,64 × 5,64 m³ quadr. Gitter	Al, C			3 Cd-, 4 St-, 4 B-Stahl-Stäbe
4	HAN 305					3 Regelstäbe BF_3-Gas in Al-Röhren
5	Hanford					
6	1. SR	6 m D, 5,4 m H quadrat. Gitter	C			Cd-Stäbe
7	GLEEP	6,1 m D, 5,2 m H 887 Kanäle	Al			4 Grob-, 1 Fein-, 6 Cd-Sicherheitsstäbe
8	BEPO	6,1 m D, 6,1 m H 900 Kanäle	Al			10 Abschalt-, 4 Regelstäbe, B_4C in St. Rohr.
9	Windscale		Al		St	24 Regelstäbe 16 Abschaltst. B-Stahl
10	BNLN	5,2 × 5,2 × 6,7 m³ 1369 horiz. Kanäle	Al, C		Beton St	16 B-Stahl-Stäbe
11	BNLE	4,88 × 4,88 × 4,88 m³	Al, C	Al	Beton St	16 B-Stahl-Stäbe
12	SRPT	1 m D, 1 m H, quadrat. Gitter, 37 Kanäle	Al		St	3 man., 3 aut. B_4C-St., 4 Cd-Sicherheitsst.
13	SA	1,5 m D, 1,7 m H 128 Kanäle	rf St.		St	18 B_4C-St. (H_2O gef.) man., 4 aut., 2 Sich.
14	G-1	9,6 m D, 8,84 m H 1337 horiz. Kanäle	Mg			B_4C-Stäbe
15	BR-1	2,30 m D, 4,83 m H	Al			10 Regelstäbe 6 Sicherh.st. Al + Cd
16	Calder Hall	9,45 m D, 6,4 m H	Mg-Leg.		St	rostfr. Stahlrohre mit B-Stahl gefüllt
17	EDF					
18	G-2 G-3	7,8 m D, 8,45 m H 1200 Kanäle	Mg	Al		Stäbe

Abschirmung	Brennstoffelemente mittl. Wärmefluß [kcal/m²h]	Brennstoffelemente Oberfl. Temp. [°C]	Kühlmittel Stoff	Kühlmittel Austrittstemp. [°C]	Kühlmittel Druck [at]	Arbeitsmedium (meist Dampf) Temp. [°C]	Arbeitsmedium (meist Dampf) Druck [at]	Leistung Wärme [MW]	Leistung Elektr. [MW]
Polyphenyl Beton, Erde	$2{,}7 \cdot 10^5$ (max $8{,}5 \cdot 10^5$)	427	Terphenyl	277 bis 377	21	232	30	16	
Pb: 10 cm H_2O: 55 cm								5 W max	

Abschirmung	mittl. Wärmefluß [kcal/m²h]	Oberfl. Temp. [°C]	Stoff	Austrittstemp. [°C]	Druck [at]	Temp. [°C]	Druck [at]	Wärme [MW]	Elektr. [MW]
								200 W	
Beton: 1,5 m, Pb: 15 cm, Holz: 1 m		38						0,01–0,02	
Beton: 2,1 m	$7{,}18 \cdot 10^3$	280	Luft	91	1			3,5–3,8	
								6 W	
								100 W	
Bet.: 1,2–1,5 m		60	Luft		1			0,1	
Gußeis.: 15 cm Beton 1,98–2,28 m		249 (max.)	Luft	90	0,88			6,5	
Stahl u. Beton: 2,44 m			Luft						
Stahl: 22,8 cm Schw.bet.: 1,3 m	$5{,}42 \cdot 10^4$	300–350	Luft	129	1			24–30	
Stahl: 22,8 cm Schw.bet.: 1,3 m	$5{,}87 \cdot 10^4$	300–350	Luft	184	1			20	
Fe: 2,5 cm; Beton: 3,2 m	$1{,}95 \cdot 10^6$	470	H_2O	55–65	8,8				
H_2O: 7 m; Beton: 3 m	$1{,}49 \cdot 10^6$	700	H_2O	260–270	103	255–261	12,9	30	5
Beton			Luft	220–270	1			40	
Baryt-Beton: 2,1 m	$1{,}16 \cdot 10^4$	250	Luft	50	0,91			2,5	
Stahl: 15 cm, Beton: 2,1 m		400	CO_2	336	7	313 177	14,7 4,4		46
			CO_2						60
		400	CO_2	300	15,2			150	30

X. **Spezielle Reaktortypen,** Moderator H_2O bzw. C, thermisch, heterogen

	Bezeichnung	Ort	erstmals kritisch
1	TTR Thermal Test Reactor	Schenectady, USA	1951
2	SR-305 Savannah River Test Pile 305	Aitken, USA	1953
2	ARGONAUT Argonne Naught Power R. (Arg. Assem. f. Univ. Training)	Lemont, USA[1])	9. Febr. 57
4	AMF-GNE		

XI. **Natrium-Graphit Reaktoren,** Moderator C, thermisch, heterogen

1	NERO Natrium Exper. Reactor Zero Energy	Harwell, England	23. Febr. 57
2	SRE Sodium Reactor Experiment	Santa Susana, USA	25. Apr. 57

XII. **Intermediäre und schnelle Reaktoren**[2])

1	CLEMEN TINE Los Alamos Fast Plutonium Reactor (abgebaut 1953)	Los Alamos, USA	Nov. 46
2	EBR-1 Experimental Breeder Reac. 1 Spaltzonen Mark I, II, III	Arco, USA	Dez. 50
3	ZEPHYR	Harwell, England	5. Febr. 54
4	S1G S2G fr. SIR Mark A,B (Subm. Inter-med. Reactor, Moderator: Be)	S1G: West Milton, USA S2G: SSN 575 - Seawolf	S1G: 55—57 S2G: 56
5	ZPR-3 Zero Power Reactor (EBR-2 Prototyp)	Arco, USA	Okt. 55
6	ZEUS	Harwell, England	Dez. 55
7	ZPR-5 Zero Power Reac. (Schneller Reak. m. therm. Steuerbereich)	Arco, USA	1956
8	FRED Dounray Fast Power Breeder	Dounray, England	1958
9	LAMPRE-1 Los Alamos Molten Pu Re Experiment No. 1	Los Alamos, USA	1960
10	EBR-2 Experimental Breeder Reactor 2	Arco, USA	1959
11	PRDC (APDA) Enrico Fermi Reactor	Monroe, USA	1959

[1]) An verschiedenen Stellen nachgebaut oder angekauft. Buenos Aires (RA 1) und Siemens-Schuckert-Werke Erlangen, Aufstellung auf dem Reaktorgelände Garching bei München. 1959

[2]) Sowjetische schnelle Reaktoren s. S. 652

Eigentümer	Entwurf	Verwendung	geschätzte Gesamtkosten [10^6 $]	geschätzte Kapitalkosten [$/kW]	geschätzte Stromkosten [mills./kWh]	geschätzte Entwicklungskosten [10^6 $]
USAEC, GE-KAPL	GE	F				
USAEC	GE-KAPL	F				
USAEC, ANL	ANL	F, U	0,1			
AMF	AMF	U				

AERE	AERE	V				
USAEC, NAA	NAA	L				

USAEC, LASL	LASL	F				
USAEC, ANL	ANL	F, B	2,73			2,5
UKAEA	AERE	F, B	0,2			
US-Navy	GE-KAPL	L,S				
USAEC	ANL					
UKAEA	AERE	F				
	ANL	F				
UKAEA	UKAEA Indust. Group	L				
	LASL	V				
USAEC, ANL	ANL	L, B	29,1			
Power Reactor Development Co	Atom. Pow. Dev. Assoc.	E, B	46,5	540		9

X. Spezielle Reaktortypen, Moderator H_2O bzw. C, thermisch, heterogen 1. F

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung D = Durchmesser L = Länge	Spaltstoffmenge insgesamt [kg U-235]	Spaltstoffmenge kritisch [kg U-235]	Brutmantel
1	TTR	90% U-235	20 Rohre: 5 cm D, 61 cm L mit Brennstofftabletten		2,7	
2	SR-305	90% U-235	16 Elemente			
3	ARGONAUT	U_3O_8 20% U-235	12 Elemente mit 17 Platten	3,7		
4	AMF-GNE	20% U-235	6 Bündel zu 24 Platten	3,8		

XI. Natrium-Graphit-Reaktoren, Moderator C, thermisch, heterogen 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung	insgesamt	kritisch	Brutmantel
1	NERO	hochanger. U	variabel			
2	SRE	2,8% U-235	31–37 Bündel mit 7 Stäben 1 St.(1,8 m L) enth. 12 U-Bolzen	71,4	40	

XII. Intermediäre und schnelle Reaktoren 1. Forts.

	Reaktor	Brennstoff	Anordnung	insgesamt	kritisch	Brutmantel
1	CLEMEN-TINE	Pu-Metall	Stäbe: 15 cm L			nat. U, Th
2	EBR-1	93,2% U-235	217 Stäbe zu 2 Bolzen 1,14 cm D, 11,4 cm L	52	48,2	nat. U
3	ZEPHYR	Pu	Pu Stäbe mit Ni-Hülle 0,635 cm D, 15 cm L			nat. U
4	S 1 G S 2 G	anger. U				
5	ZPR-3	z. Z. U-235 später Pu				
6	ZEUS	nat. U + 40 bis 50% U-235	84 Rohre 1,9cm a.D. 91cm L. in Gruppen zu 7			nat. U
7	ZPR-5					
8	FRED	nat. U + U-235 oder Pu	350 röhrenförmige Elemente			nat. U
9	LAMPRE-1			10-15 Pu		
10	EBR-2	49% U-235	4500 Stäbchen	363	170	verarmtes Uran
11	PRDC	U-Mo-Legier. 27% U-235	91 Stabbeh. 6,6 × 6,6 × 27,4 cm^3 mit je 144 Stäbchen	485	485	verarmtes Uran

Reflektor	Neutronenfluß thermisch $n/cm^2 s$	Neutronenfluß schnell $n/cm^2 s$	spezifische Leistung [kW/kg]	Leistungsdichte [kW/l]	Abbrand [%]	Lebensdauer der Brennstoffelemente	Konversionsgrad	Temperatur-Koeffizient [$°C^{-1}$]
C: 51 cm	$3 \cdot 10^{11}$							-10^{-4}
C								
C: 30 cm	10^{11} (max)		2,5	0,045				$-1{,}5 \cdot 10^{-4}$
C	10^{11}							
C	10^{8}							
C: 61 cm	$4 \cdot 10^{13}$	$1{,}5 \cdot 10^{12}$	340		12,5	300 d		$-1{,}25 \cdot 10^{-5}$
nat. U: 15 cm Stahl: 15 cm	niedrig	10^{13}		7,2				$-2{,}6 \cdot 10^{-5}$
nat. U: 23 cm C: 48 cm		$8 \cdot 10^{13}$	23	167	0,3		1	$-3{,}5 \cdot 10^{-5}$
		$8 \cdot 10^{8}$					2,1	
							2,1	
							1,7	
verarmtes Uran 46 cm		$2{,}6 \cdot 10^{15}$	314	1000	2	0,25 a	1,2	$-8 \cdot 10^{-5}$
		$5 \cdot 10^{15}$	553 (Kern)	812 (Kern)	1		1,2	$-2 \cdot 10^{-5}$

X. **Spezielle Reaktortypen,** Moderator H_2O bzw. C, thermisch, heterogen 2. F.

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone D = Durchmesser H = Höhe	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	TTR	Ringf. Tank: 31 cm iD, 46 cm aD, 46 cm H	Al	Al		4 Cd-Folien (Fe umh.) 2 Cd-Stäbe
2	SR-305					
3	ARGO-NAUT	Ringf. Tank: 61 cm iD, 92 cm aD, 61 cm H	Al	Al	Al	veränderl. Mod.spieg. Cd-Abs.platt. od. Stä.
4	AMF-GNE			Al	Al	veränderl. Mod-spieg. 4Abs.platt. (Sig.typ)

XI. **Natrium-Graphit-Reaktoren,** Moderator C, thermisch, heterogen 2. Forts.

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	NERO					
2	SRE	Zylinder: 1,8 m D, 1,8 m H	Zr St		St	4 B-Ni-Stäbe

XII. **Intermediäre und schnelle Reaktoren** 2. Forts.

	Reaktor	Abmessungen Spaltzone	Hülsenmaterial	Brennstoff-legierung	Reaktorgefäß	Steuerung
1	CLEMEN-TINE	15 cm D, 15 cm H	St			4 B^{10}-Stäbe
2	EBR-1	Hexagon: 19 cm D (flach), 22 cm H	St	Zr	St	bewegliche Brut-stäbe
3	ZEPHYR	15 cm D, 15 cm H	Ni			6 U-Stäbe, U-Sichh.-Block unterh. Kern
4	S 1 G S 2 G					
5	ZPR-3					
6	ZEUS	20 cm D, 20 cm H				bewegl. Brennstoff-stäbe (i. Gr. z. je 7)
7	ZPR-5					
8	FRED	53,5 cm D, 53,5 cm H	Nb		St	bewegl. Brennstoff-stäbe
9	LAMPRE-1					
10	EBR-2	48 cm D, 48 cm H	St	div.	St	12 bewegl. Brenn-stoffelemente
11	PRDC	76 cm D, 78 cm H	St Zr	Mo	St	8 Sicherh.- u. 2 Tr.-stäbe aus B^{10} ang. B

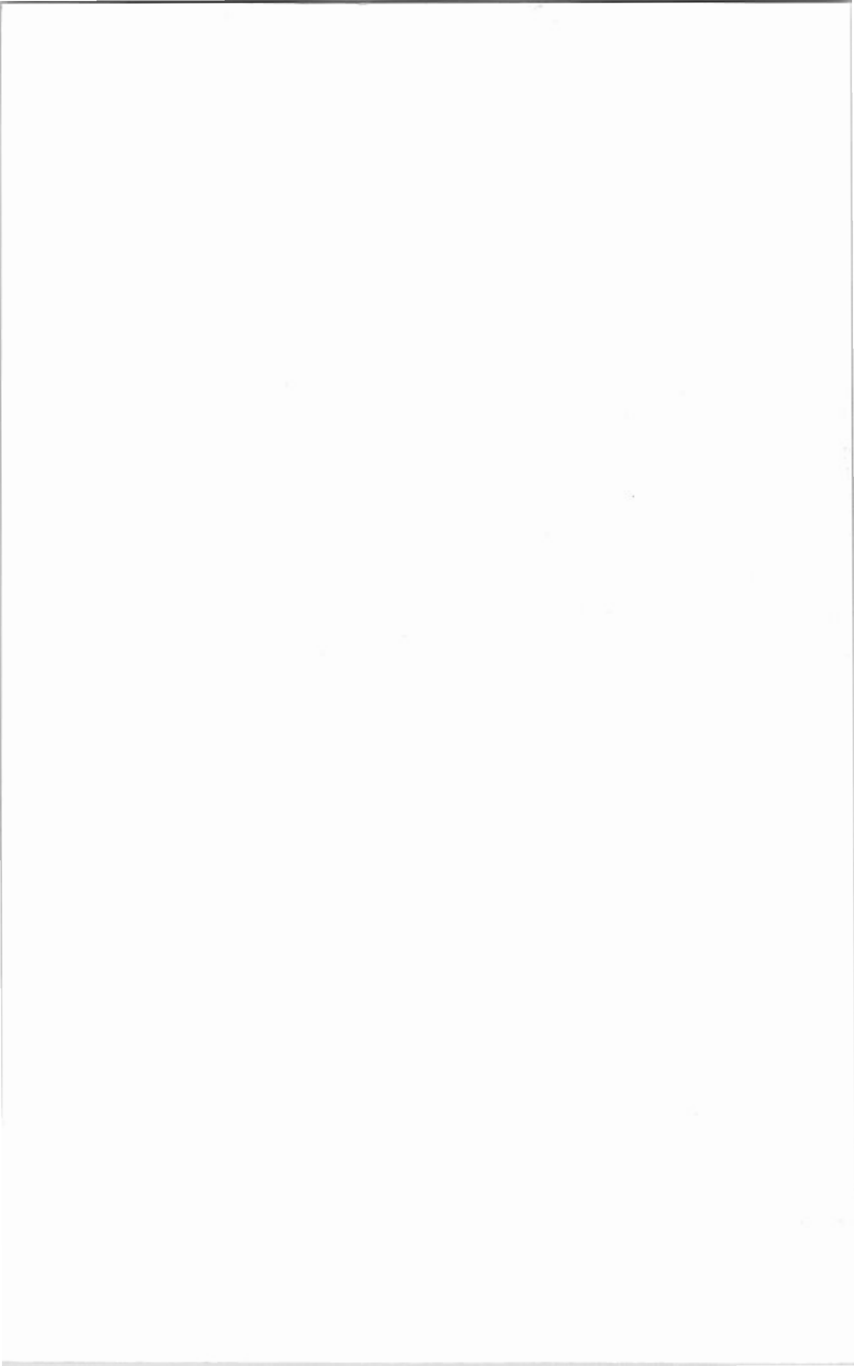
Abschirmung	Brennst.elemente: mittl. Wärmefluß [kcal/m² h]	Brennst.elemente: Oberfl.-Temp. [°C]	Kühlmittel: Stoff	Kühlmittel: Austritts-temp. [°C]	Kühlmittel: Druck [at]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Temp. [°C]	Arbeitsmedium (meist Dampf): Druck [at]	Leistung: Wärme [MW]	Leistung: Elektr. [MW]
Beton: 1,83 m			H_2O					0,01	
C, Beton			H_2O						
Beton: 2,13 m	vernach-lässigbar	38	H_2O	38	1			0,01 (max)	
Beton: 1,5 m			H_2O					0,01	
			Na					<100W	
Schwerbeton	$5{,}67 \cdot 10^5$		Na	516	1	Na 455	56,2	20	6
Pb: 20cm, Fe-B-Lag.: 76 cm, Beton: 4 m	$5{,}63 \cdot 10^4$		Hg	100	4,4			0,025	
Fe: 15 cm Beton: 2,75 cm	$5{,}67 \cdot 10^5$	335	NaK	349	1	289	28	1,4 (max)	0,2
Beton		40 (bei 30 W)						2 – 30 W	
H_2O			Na					40 (?) 100 (?)	
			Na						
C, Beton								100 W	
B-C: 1,2 m Beton: 1,5 m			NaK	350		270	10	60	15
								1	
B-C: 61 cm Beton: 1,8 m	$1{,}85 \cdot 10^6$	510	Na	483	1,76	455	89	62,5	20
B-C, rf. Stahl, Beton	$1{,}8 \cdot 10^6$	415 (mittl.)	Na	427	1	400	42	300	90

Sowjetische intermediäre und schnelle Reaktoren

Bezeichn.	Brennstoff	Reflektor	Kühlmittel	Leistung		Neutronen-fluss	Zeitp. der Inbetriebn.
				[MW – W]	[MW – el]		
BR-1	Pu	U, Cu	–	50 W			wied.abgb.
BR-2	Pu + U	U	Hg	0,1		10	
BR-5	Pu	U	Na	5		10	
BR-3*	Pu	U, H_2O	–	0,05			
BN-50	Pu – U		Na	200	50		geplant
BN-250	Pu		Na		250		geplant

Isotopentabelle

Die Isotopentabelle enthält in der ersten Spalte Name, Ordnungszahl und chemisches Atomgewicht der Elemente. Außerdem sind die Absorptions- und Streuquerschnitte für das natürliche Isotopengemisch angegeben. Die 2. Spalte enthält sämtliche bisher isolierte Isotope. In den folgenden Spalten sind die Eintragungen für stabile und instabile Isotope verschieden. Bei den stabilen ist die natürliche Häufigkeit des Isotops sowie dessen Absorptions-, Aktivierungs- und — soweit bekannt — Streuquerschnitt gegenüber thermischen Neutronen angegeben (kursive Schrift). Bei den instabilen findet man die Halbwertszeit, den Umwandlungstyp sowie die Energie der Zerfallsprodukte (steile Schrift). Die Wirkungsquerschnitte sind aus D. J. Hughes und R. B. Schwartz, Neutrons Cross Sections, 2. Aufl., 1958 (BNL-235) entnommen, die Daten der instabilen Kerne entstammen im wesentlichen der Table of Isotopes von Strominger, Hollander und Seaborg, Rev. Mod. Phys., **30**, 585 — 904, 1958. Bei komplexem Zerfall haben wir uns auf die wichtigsten Zerfallsenergien beschränkt. Die häufigste Zerfallsart bzw. -energie steht zuerst, wenn entsprechende Angaben vorliegen, was meist der Fall ist.



Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotope	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	*therm. Streuquerschnitt* [b] *bzw.* γ-Energie [MeV]
1 Wasserstoff	^{1}H	*99,985*		*0,332*	*38 (Gas)*
A = 1,0080	^{2}H	*0,015*		*0,00046*	*7*
σ_a = 0,33	^{3}H	12,26 a	β^-	0,018	keine γ
σ_s = 38 (Gas)					
2 Helium	^{3}He	*0,00013*		*5500*	*1,0*
A = 4,003	^{4}He	*~ 100*		*0*	*0,8*
σ_a = 0	^{5}He	$2 \cdot 10^{-21}$ s	n, α		
σ_s = 0,8	^{6}He	0,82 s	β^-	3,5	keine γ
3 Lithium	^{5}Li	~ 10^{-21} s	p, α		
A = 6,94	^{6}Li	*7,5*		{ *A: 0,028* / *nα: 945*	
σ_a = 71	^{7}Li	*92,5*		*A: 0,033*	
σ_s = 1,4	^{8}Li	0,84 s	β^-, (2α)	13	keine γ
	^{9}Li	0,17 s	β^-, (n, 2α)	~ 8	
4 Beryllium	^{7}Be	53 d	K, γ	*np: 54000*	0,47
A = 9,013	^{8}Be	~ 10^{-15} s	2α	2α: 0,035	
σ_a = 0,010	^{9}Be	*100*		*0,010*	*7*
σ_s = 7	^{10}Be	$2,7 \cdot 10^{6}$ a	β^-	0,56	keine γ
5 Bor	^{8}B	0,6 s	β^+(2α)	β^+: 14, 2α: 3	
A = 10,82	^{10}B	*18,8*		*nα: 3813*	
σ_a = 755	^{11}B	*81,2*		*A: < 0,05*	
σ_s = 4	^{12}B	0,025 s	β^-, γ	13,4; α: 0,195 (1,3‰)	4,4
6 Kohlenstoff	^{10}C	19,1 s	β^+, γ	2,1	0,72; 1,03
A = 12,011	^{11}C	20,5 min.	β^+	0,96	keine γ
σ_a = 0,0034	^{12}C	*98,89*		*A: 0,0033*	
σ_s = 4,8	^{13}C	*1,11*		*0,005*	
	^{14}C	5568 a	β^-	0,158	keine γ
	^{15}C	2,3 s	β^-, γ	4,5; 9,8	5,3
7 Stickstoff	^{12}N	0,012 s	β^+, (3α)	16,7: 3α: ~ 4	
A = 14,008	^{13}N	10,0 min.	β^+	1,20	
σ_a = 1,88	^{14}N	*99,63*		*nγ: 0,08*	
σ_s = 10				*np: 1,75*	
	^{15}N	*0,37*		*A: 0,024*	
	^{16}N	7,4 s	β^-, γ	4,4; 10,4; 3,3	6,13; 7,10;
	^{17}N	4,14 s	β^-, n	3,7	
8 Sauerstoff	^{14}O	72 s	β^+, γ	1,83; 4,1	2,3
A = 16,000	^{15}O	2,1 min.	β^+	1,7	keine γ
σ_a = < 0,0002	^{16}O	*99,759*			
σ_s = 4,2	^{17}O	*0,037*		*nα: 0,4*	
	^{18}O	*0,204*		*A = 0,00021*	
	^{19}O	29 s	β^-, γ	2,9; 4,4	0,197; 1,37; 0,11

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
9 Fluor	^{17}F	66s	β^+	1,75	keine γ
A = 19,000	^{18}F	1,87h	β^+, K	0,65	keine γ
$\sigma_a < 0{,}01$	^{19}F	*100*		*A: 0,009*	
$\sigma_s = 3{,}9$	^{20}F	11s	β^-, γ	5,42	1,63
	^{21}F	5s	β^-	5,7	
10 Neon	^{18}Ne	1,6s	β^+	3,2	
A = 20,183	^{19}Ne	18,5s	β^+	2,2	keine γ
$\sigma_a < 2{,}8$	^{20}Ne	*90,92*			
$\sigma_s = 2{,}4$	^{21}Ne	*0,26*			
	^{22}Ne	*8,82*		*A: 0,036*	
	^{23}Ne	40s	β^-, γ	4,39; 3,95; 2,4	0,44; 1,65
	^{24}Ne	3,4 min	β^-, γ	1,98; 1,10	0,47; 0,88
11 Natrium	^{20}Na	0,3s	β^+, α	> 3,5; α: > 2	
A = 22,991	^{21}Na	23s	β^+	2,5	keine γ
$\sigma_a = 0{,}505$	^{22}Na	2,6a	β^+.K, γ	0,54	1,28
$\sigma_s = 4{,}0$	^{23}Na	*100*		*A: 0,536*	
	^{24}Na	15,0h	β^-, γ	1,39	2,753; 1,368
	^{25}Na	60s	β^-, γ	4,0; 3,1;2,6	0,98; 0,58; 0,40; 1,60
12 Magnesium	^{23}Mg	12s	β^+	3,0	keine γ
A = 24,32	^{24}Mg	*78,8*		*0,034*	
$\sigma_a = 0{,}063$	^{25}Mg	*10,1*		*0,280*	
$\sigma_s = 3{,}6$	^{26}Mg	*11,1*		*0,06*	
	^{27}Mg	9,5 min	β^-, γ	1,75; 1,57	0,84, 1,02; 0,18
	^{28}Mg	21,3h	β^-, γ	0,45	0,032; 1,35; 0,95; 0,40
13 Aluminium	^{24}Al	2,1s	β^+, γ	8,5	1,38−7,2
A = 26,98	^{25}Al	7,3s	β^+	3,24	
$\sigma_a = 0{,}230$	^{26}Al*	6,5s	β^+	3,21	keine γ
$\sigma_s = 1{,}4$	^{26}Al	$8 \cdot 10^5$ a	β^+, K, γ	1,2	1,82; 1,12; 2,9
	^{27}Al	*100*		*A: 0,21*	
	^{28}Al	2,3 min	β^-, γ	2,87	1,78
	^{29}Al	6,6 min	β^-, γ	2,5; 1,4	1,28; 2,43
14 Silizium	^{26}Si	1,7s	β^+		
A = 28,09	^{27}Si	4,4s	β^+	3,8	
$\sigma_a = 0{,}16$	^{28}Si	*92,17*		*0,080*	
$\sigma_s = 1{,}7$	^{29}Si	*4,71*		*0,28*	
	^{30}Si	*3,12*		*0,4*	
	^{31}Si	2,62h	β^-, γ	1,48	1,26
	^{32}Si	~ 710a	β^-	0,1	keine γ
15 Phosphor	^{28}P	0,28s	β^+, γ	11; ~ 8	1,78; 2,6−7,6
A = 30,975	^{29}P	4,5s	β^+, γ	3,94	1,28; 2,43
$\sigma_a = 0{,}20$	^{30}P	2,5 min	β^+, γ	3,3	2,16
$\sigma_s = 5{,}0$	^{31}P	*100*		*A: 0,191*	
	^{32}P	14,5d	β^-	1,71	keine γ
	^{33}P	25d	β^-	0,25	keine γ
	^{34}P	12,4s	β^-, γ	5,1; 3,2	2,1; 4,0

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
16 Schwefel	^{31}S	2,6s	β^+	4,4	
A = 32,066	^{32}S	*95,0*		*nα: 0,0018*	
σ_a = 0,52	^{33}S	*0,75*		*A :0,0015*	
σ_s = 1,1	^{34}S	*4,2*		*A : 0,26*	
	^{35}S	87d	β^-	0,167	**keine γ**
	^{36}S	*0,017*		*A : 0,14*	
	^{37}S	5,0 min	β^-, γ	1,6; 4,7	**3,1**
	^{38}S	2,87 h	β^-, γ	1,1; 3,0	1,88
17 Chlor	^{32}Cl	0,31s	β^+, γ	10,8	2,2; 4,8; 4,3
A = 35,457	^{33}Cl	2,8s	β^+, γ	4,2	2,8
σ_a = 33,6	^{34}Cl*	32,4 min	β^+, γ, i.Ü:0,14	4,5; 2,5; 1,4	2,1; 1,2; 3,3
σ_s = 16	^{34}Cl	1,5s	β^+	4,5	
	^{35}Cl	*75,53*		*A: 30,2*	
	^{36}Cl	$3,1 \cdot 10^5$a	β^-,K	0,71	**keine γ**
	^{37}Cl	*24,47*		*A : 0,56*	
	^{38}Cl*	1s	i.Ü : 0,66		
	^{38}Cl	37,3 min	β^-, γ	4,8; 1,1; 2,7	2,1; 1,6
	^{39}Cl	55 min	β^-, γ	1,91; 2,18; 3,45	0,246; 1,27; 1,52
	^{40}Cl	1,4 min	β^-, γ	~ 3,2; ~ 7,5	1,46; 2,75; 6
18 Argon	^{35}Ar	1,8s	β^+, γ	4,95	1,22; 1,76
A = 39,944	^{36}Ar	*0,337*		*A : 6*	
σ_a = 0,66	^{37}Ar	35d	K, L		
σ_s = 1,5	^{38}Ar	*0,063*		*A : 0,8*	
	^{39}Ar	260a	β^-	0.57	
	^{40}Ar	*99,60*		*A : 0,53*	
	^{41}Ar	1,82h	β^-, γ	1,20; 2,49	1,29
	^{42}Ar	> 3,5a	β^-		
19 Kalium	^{37}K	1,2 s	β^+	5,1	
A = 39,100	^{38}K	0,95s	β^+		
σ_a = 2,07	^{38}K*	7,7 min	β^+, γ	2,7	2,1
σ_s = 1,5	^{39}K	*93,08*		*1,94*	
	^{40}K	*0,0119*		*70*	
		$1,3 \cdot 10^9$a	β^-,K, γ	1,33	1,46
	^{41}K	*6,91*		*1,24*	
	^{42}K	12,5h	β^-, γ	3,5; 2,0	1,5; 0,32
	^{43}K	22h	β^-, γ	0,83; 0,24—1,84	0,37; 0,61; 0,39
	^{44}K	22 min	β^-, γ	4,9; 1,5	1,1; 2,1; 2,5
	^{45}K	34 min	β^-		
20 Kalzium	^{38}Ca	0,66 s	β^+		3,5
A = 40,08	^{39}Ca	1,0s	β^+	5,7	
σ_a = 0,44	^{40}Ca	*96,9*		*0,22*	
σ_s = 3,1	^{41}Ca	$1,1 \cdot 10^5$a	K		
	^{42}Ca	*0,64*		*42*	
	^{43}Ca	*0,14*			
	^{44}Ca	*2,1*		*A : 0,67*	
	^{45}Ca	160d	β^-	0,25	keine γ
	^{46}Ca	*0,0032*		*A : 0,25*	
	^{47}Ca	4,7d	β^-, γ	0,7; 2,0	1,30; 0,81; 0,50
	^{48}Ca	*0,18*		*A : 1,1*	
	^{49}Ca	8,7 min	β^-, γ	2,0; 1,0	3,09; 4,05; 4,7

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
21 Skandium	^{40}Sc	0,2s	β^+, γ	9	3,7
A = 44,96	^{41}Sc	0,87s	β^+	5	
σ_a = 24,0	^{42}Sc	0,68s	β^+	4,8	keine γ
σ_s = 24	^{43}Sc	3,9h	β^+, γ	1,19; 0,82; 0,39	0,37; 0,62; 0,25
	^{44}Sc*	2,4d	i.Ü:0,271		
	^{44}Sc	4,0h	β^+,K, γ	1,47	1,16; 2,54
	^{45}Sc	*100*		*24,0*	
	^{46}Sc*	20s	i. Ü: 0,14		
	^{46}Sc	84d	β^-, γ	0,36	1,12; 0,88
	^{47}Sc	3,4d	β^-, γ	0,44; 0,60	0,16
	^{48}Sc	44h	β^-, γ	0,64	1,32; 1,04; 0,99
	^{49}Sc	57 min	β^-	2,0	keine γ
	^{50}Sc	1,5 min	β^-, γ	3,5	1,6
22 Titan	^{43}Ti	0,6s	β^+		
A = 47,90	^{44}Ti	~ 10^3a	K, γ		0,072; 0,16
σ_a = 5,8	^{45}Ti	3,08h	β^+,K	1,02	
σ_s = 4	^{46}Ti	*8,0*		*0,6*	
	^{47}Ti	*7,4*		*1,7*	
	^{48}Ti	*73,8*		*8,3*	
	^{49}Ti	*5,5*		*1,9*	
	^{50}Ti	*5,3*		< *0,2*	
	^{51}Ti	5,80 min	β^-, γ	2,1; 1,5	0,32; 0,93; 0,61
23 Vanadium	^{46}V	0,4s	β^+	> 6	
A = 50,95	^{47}V	31 min	β^+	1,89	keine γ
σ_a = 4,98	^{48}V	16,2d	β^+,K, γ	0,69	0,99; 1,32; 2,25
σ_s = 5	^{49}V	330d	K		
	^{50}V	*0,25*; $4\cdot10^{14}$a	K	*250*	
	^{51}V	*99,75*		*A : 4,5*	
	^{52}V	3,77 min	β^-, γ	2,6	1,4
	^{53}V	2,0 min	β^-, γ	2,50	1,00
	^{54}V	55s	β^-, γ	3,3	0,99; 0,84; 2,21
24 Chrom	^{46}Cr	1,1s	β^+		
A = 52,01	^{47}Cr	0,4 s			
σ_a = 3,1	^{48}Cr	23h	K, γ		0,31; 0,12
σ_s = 3,0	^{49}Cr	42 min	β^+, γ	1,54; 1,39	0,15; 0,09; 0,06
	^{50}Cr	*4,41*		*17,0*	
	^{51}Cr	27d	K, γ		0,32
	^{52}Cr	*83,76*		*0,76*	
	^{53}Cr	*9,55*		*18,2*	
	^{54}Cr	*2,38*		< *0,3*	
	^{55}Cr	3,6 min	β^-	2,8	keine γ
25 Mangan	^{50}Mn	0,28s	β^+	> 6,3	
A = 54,94	^{51}Mn	45 min	β^+	2,2	keine γ
σ_a = 13,2	^{52}Mn*	21 min	β^+, γ,i.Ü:0,39	2,7	1,4
σ_s = 2,3	^{52}Mn	5,7d	K, β^+, γ	0,6	1,4; 0,9; 0,7
	^{53}Mn	~ $2\cdot10^6$ a	K		keine γ

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
25 Mangan	$^{54}Mn^*$	2 min (?)	β^+ oder e^-		
Forts.	^{54}Mn	300d	K, γ		0,84
	^{55}Mn	*100*		*13.2*	
	^{56}Mn	2,58h	β^-, γ	2,8; 1,0; 0,7	0,85; 1,8; 2,13
	^{57}Mn	1,7 min	β^-, γ	2,6	0,117; 0,134
26 Eisen	^{52}Fe	8h	β^+,K,	0,8	0,16
$A = 55{,}85$	^{53}Fe	9 min	β^+, γ	2,6	0,37
$\sigma_a = 2{,}53$	^{54}Fe	*5,87*		*2,3*	
$\sigma_s = 11$	^{55}Fe	2,9a	K		
	^{56}Fe	*91,6*		*2,7*	
	^{57}Fe	*2,20*		*2,5*	
	^{58}Fe	*0,33*		*2,5*	
	^{59}Fe	45d	β^-, γ	0,46; 0,27; 1,56	1,10; 1,29; 0,19
	^{60}Fe	$\sim 3 \cdot 10^5$a	β^-,		
	^{61}Fe	5,5 min	β^-, γ		
27 Kobalt	^{54}Co	0,18s	β^+	> 7	
$A = 58{,}94$	^{55}Co	18h	β^+,K, γ	1,50; 1,0	0,93; 0,48–2,2
$\sigma_a = 37{,}0$	^{56}Co	77d	K, β^+, γ	0,44; 1,50	0,85;1,2;1,0–3,5
$\sigma_s = 7$	^{57}Co	267d	K, γ		0,014;0,12;0,13
	$^{58}Co^*$	9h	i.Ü.: 0,025		
	^{58}Co	71d	K, β^+,γ	0,48	0,81; 1,64
	^{59}Co	*100*		*37,0*	
	$^{60}Co^*$	10,5 min	β^-,i.Ü. 0,059	1,5	0,59
	^{60}Co	5,2a	β^-, γ	0,31; 1,48	1,33; 1,17
	^{61}Co	1,65h	β^-, γ	1,22	0,070
	$^{62}Co^*$	1,6 min	β^-, γ		
	^{62}Co	14 min	β^-, γ	2,8; 0,9	1,2; 1,47–2,5
28 Nickel	^{56}Ni	6,4d	K, γ		0,17–1,75
$A = 58{,}71$	^{57}Ni	36h	K, β^+, γ	0,84; 0,72; 0,35	1,37; 1,89; 0,13
$\sigma_a = 4{,}8$	^{58}Ni	*68,0*		*4,4*	
$\sigma_s = 17{,}5$	^{59}Ni	$8 \cdot 10^4$a	K		
	^{60}Ni	*26,2*		*2,6*	
	^{61}Ni	*1,1*		*2,0*	
	^{62}Ni	*3,7*		*15*	
	^{63}Ni	*125*a	β^-	0,063	keine γ
	^{64}Ni	*1,2*		*A: 1,6*	
	^{65}Ni	2,56h	β^-, γ	2,10; 0,60; 1,01	1,5; 1,12; 0,37
	^{66}Ni	56h	β^-	0,2	keine γ
29 Kupfer	^{58}Cu	9,5 min	β^+		
$A = 63{,}54$	^{58}Cu	3s	β^+	~ 8	
$\sigma_a = 3{,}77$	^{59}Cu	81s	β^+, γ	3,7	1,30; 0,87; 0,34
$\sigma_s = 7{,}2$	^{60}Cu	24 min	β^+, γ, K	2,0; 3,0; 3,9	1,33; 1,76; 0,85 2,1 – 4,0
	^{61}Cu	3,3h	β^+,K, γ	1,22; 0,94; 0,56	0,28; 0,66; 1,22
	^{62}Cu	9,9 min	β^+, γ	2,9	0,69; 0,88; 1,13

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
29 Kupfer	^{63}Cu	*69,0*		*4,5*	
Forts.	^{64}Cu	12,8 h	K, β^-, β^+, γ	β^+: 0,66; β^-: 0,57	1,34
	^{65}Cu	*31,0*		*2,2*	
	^{66}Cu	5,1 min	β^-, γ	2,63; 1,59	1,04
	^{67}Cu	61 h	β^-, γ,	0,40; 0,48; 0,58	0,182; 0,090;
	^{68}Cu	32 s	β^-	3,0	
30 Zink	^{60}Zn	2,1 min	β^+, K		
A = 65,38	^{61}Zn	1,5 min	β^+	5	
σ_a = 1,10	^{62}Zn	9 h	K, β^+, γ,	0,66	0,041; 0,59
σ_s = 3,6	^{63}Zn	38 min	β^+,K, γ	2,36; 1,40	0,96; 1,9; 2,6
	^{64}Zn	*48,9*		nα: *15* μb	
	^{65}Zn	245 d	K, β^+, γ	0,33	1,12
	^{66}Zn	*27,8*		nα: < *20* μb	
	^{67}Zn	*4,1*		nα: *6* μb	
	^{68}Zn	*18,6*		*A*: *0,097*	
	$^{69}Zn^*$	14 h	i. Ü.: 0,44		
	^{69}Zn	52 min	β^-	0,90	keine γ
	^{70}Zn	*0,63*		*A*: *0,085*	
	$^{71}Zn^*$	3 h	β^-, γ	1,5	0,4; 0,5; 0 6
	^{71}Zn	2,2 min	β^-, γ	2,4	0,51
	^{72}Zn	49 h	β^-, γ	0,3; 1,6	
31 Gallium	^{64}Ga	2,5 min	β^+, γ	6,09; 2,81	0,97−3,8
A = 69,72	^{65}Ga	15 min	β^+, γ, i. Ü.: 0,052	2,1; 1,4; 0,8; 2,2	0,09; 0,11
σ_a = 2,80					
σ_s = 4	^{65}Ga	8 min	β^+	2,2	keine γ
	^{66}Ga	9,4 h	β^+,K, γ	4,15	1,04; 2,75;
	^{67}Ga	78 h	K, γ,		0,092; 0,18
	^{68}Ga	68 min	β^+,K, γ	1,88; 0,78	1,10
	^{69}Ga	*60,1*		*2,0*	
	^{70}Ga	21 min	β^-, γ	1,65	1,04; 0 17
	^{71}Ga	*39,9*		*5,1*	
	^{72}Ga	14,1 h	β^-, γ	0,64−3,17	0,84; 0,60−3,4
	^{73}Ga	5 h	β^-	1,4	
	^{74}Ga	7,8 min	β^-	2,65; 2,0; 1,1	0,60; 2,3
32 Germanium	^{66}Ge	2,5 h	K, β^+		0,045;0,114;0,07
A = 72,60	^{67}Ge	19 min	β^+, γ	2,9	0,17; 0,68; 1,47
σ_a = 2,45	^{68}Ge	250 d	K		keine γ
σ_s = 3	^{69}Ge	40 h	K, β^+, γ	1,21; 0,6	1,12; 0,07−1,6
	^{70}Ge	*20,5*		*3,4*	
	^{71}Ge	11 d	K		keine γ
	^{72}Ge	*27,4*		*0,98*	
	^{73}Ge	*7,8*		*13,7*	
	$^{73}Ge^*$	0,53 s	i. Ü.: 0,067		0,013; 0,054
	^{74}Ge	*36,5*		*0,62*	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
32 Germanium Forts.	^{75}Ge*	49s	i. Ü.: 0,14		
	^{75}Ge	82 min	β^-, γ	1,18; 0,92	0,27; 0,07-0,63
	^{76}Ge	*7,8*		*0,36*	
	^{77}Ge*	52s	β^-, i. Ü.: 0,16	2,9	0,21
	^{77}Ge	12h	β^-, γ	2,20; 1,38; 0,71	0,04 − 2,3
	^{78}Ge	86 min	β^-, γ	0,9	
33 Arsen	^{68}As	~ 7 min			
A = 74,91	^{69}As	15 min	β^+, γ	2,9	0,23
σ_a = 4,3	^{70}As	50 min	β^+, γ	1,4; 2,5	0,18 − 3,25
σ_s = 6	^{71}As	62h	K, β^+, γ,	0,81	0,175; 0,023
	^{72}As	26h	K, β^+, γ	2,50; 3,34 u. a.	0,84; 0,63 − 3,74
	^{73}As	76d	K		s. ^{73}Ge*
	^{74}As	17d	K, β^-, β^+, γ	β^-: 1,36; 0,72; β^+: 0,93; 1,53	0,60; 0,64
	^{75}As	*100*		*4,3*	
	^{76}As	26,7h	β^-, γ	2,96; 2,41	0,55; 0,65 − 2,06
	^{77}As	39h	β^-, γ	0,69	0,24; 0,09 − 0,53
	^{78}As	90 min	β^-, γ	4,1; 4,1	0,61; 07; 1,32
	^{79}As	9 min	β^-	2,3	
	^{80}As	~ 36s			
34 Selen	^{70}Se	4,4 min	β^+		
A = 78,96	^{71}Se	4,5 min	β^+,γ	3,4	0,16
σ_a = 12,3	^{72}Se	9,7d	K		0,05
σ_s = 11	^{73}Se	7,1h	β^+, γ, K	1,3; 0,75; 1,68	0,35; 0,07
	^{73}Se	44 min	β^+	1,7	
	^{74}Se	*0,93*		*50*	
	^{75}Se	127d	K, γ		0,025 − 0,40
	^{76}Se	*9,1*		*85*	
	^{77}Se	*7,5*		*42*	
	^{77}Se*	17s	i.Ü.: 0,16		
	^{78}Se	*23,6*		*0,4*	
	^{79}Se*	3,9 min	i.Ü.:0,096		
	^{79}Se	$\geq 6{,}6 \cdot 10^4$ a	β^-	0,16	
	^{80}Se	*49,9*		*0,61*	
	^{81}Se*	57 min	i.Ü.:0,103		
	^{81}Se	18 min	β^-	1,38	
	^{82}Se	*9,0*		*2,1*	
	^{83}Se	69s	β^-, γ	3,4	1,0; 2,0 u. a
	^{83}Se	25 min	β^-, γ	1,5	0,35 u. a.
	^{84}Se	3,3 min	β^-		
	^{85}Se	40s	β^-		
	^{86}Se	17s	β^-		
35 Brom	^{74}Br	36 min	β^+,K, γ		0,64
A = 79,916	^{75}Br	1,6h	K, β^+, γ	1,70; 0,8; 0,3; 0,6	0,29
σ_a = 6,7	^{76}Br	17h	β^+, γ	3,57; 0,6 − 1,7	1,2; 0,20-0,96
σ_s = 6	^{77}Br	57h	K, β^+, γ	0,34	0,52; 0,086-1,0;

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
35 Brom Forts.	$^{78}Br^*$	6,4 min	i.Ü.: 0,154		0,05; 0,11
	^{78}Br	< 6 min	β^+	2,4	
	^{79}Br	*50,6*		*A: 10,4*	
	$^{80}Br^*$	4,5 h	i.Ü:0,086		0,049; 0,037
	^{80}Br	18 min	β^-, K, β^+, γ	β^-: 2,0; 1,4; β^+: 0,86	0,62
	^{81}Br	*49,4*		*A: 3,1*	
	^{82}Br	35,9 h	β^-, γ	0,46	0,55; 0,77; 0,6–2
	^{83}Br	2,3 h	β^-, γ	0,94	0,051;
	^{84}Br	6 min	β^-, γ	1,9; 0,8; 3,2	0,9; 0,44; 1,5; 1,9
	^{84}Br	32 min	β^-, γ	4,68; 1,7; 2,5; 3,6	0,89; 0,3 – 3,9
	^{85}Br	3,0 min	β^-	2,5	keine γ
	^{87}Br	56 s	β^-, γ, (n)	2,6; 8,0	3,2; 5,4
	^{88}Br	16 s	β^-		
	^{89}Br	4,5 s	β^- (n)		
	^{90}Br	1,4 s	n		
36 Krypton $A = 83{,}80$ $\sigma_a = 31$ $\sigma_s = 7{,}2$	^{76}Kr	10 h	K, γ		0,028 – 0,40
	^{77}Kr	1,2 h	β^+, K, γ	1,86; 1,67; 0,85	0,024 – 0,87
	^{78}Kr	*0,35*		*A: 2,0*	
	$^{79}Kr^*$	55 s	i.Ü.: 0,13		0,13
	^{79}Kr	34 h	K, L, β^+, γ	0,60; 0,34	0,08 – 0,83
	^{80}Kr	*2,27*		*A: 95*	
	$^{81}Kr^*$	13 s	i.Ü.: 0,19		
	^{81}Kr	$2 \cdot 10^5$ a	K		0,012
	^{82}Kr	*11,6*		*45*	
	^{83}Kr	*11,5*		*220*	
	$^{83}Kr^*$	1,86 h	i.Ü:0,042		0,009
	^{84}Kr	*57,0*		*A: 0,16*	
	$^{85}Kr^*$	4,4 h	β^-, i.Ü.: 0,31	0,83	0,15
	^{85}Kr	10,4 a	β^-, γ	0,67	0,52
	^{86}Kr	*17,3*		*A: 0,06*	
	^{87}Kr	78 min	β^-, γ	3,8; 1,3; ~ 3,3	0,40; 0,85; 2,57
	^{88}Kr	2,8 h	β^-, γ	0,52; 2,7; 0,9	2,4; 0,19 u. a.
	^{89}Kr	3,2 min	β^-	4,0	
	^{90}Kr	33 s	β^-	3,2	
	^{91}Kr	10 s	β^-	3,6	
	^{92}Kr	3 s	β^-		
	^{93}Kr	2 s	β^-		
	^{94}Kr	1,4 s	β^-		
	^{95}Kr	kurz	β^-		
	^{97}Kr	~ 1 s	β^-		
37 Rubidium $A = 85{,}48$ $\sigma_a = 0{,}73$ $\sigma_s = 12$	^{79}Rb	24 min	β^+		
	$<^{81}Rb$	8 d			
	^{81}Rb	4,7 h	K, β^+, γ	1,0; 0,58; 0,33	0,253; 0,45; 1,1
	$^{82}Rb^*$	6,3 h	K, β^+, γ	0,77	0,19 – 1,46
	^{82}Rb	75 s	β^+	3,2	keine γ
	^{83}Rb	83 d	K, γ		0,52

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
37 Rubidium Forts.	$^{84}Rb^*$	21 min	i.Ü.: 0,46		0,23; 0,89
	^{84}Rb	33d	K, β^+, γ, β^-	β^+: 0,82; 1,63; β^-: 0,91	0,89 − 1,9
	^{85}Rb	*72,2*		*A : 0,80*	
	$^{86}Rb^*$	1,0 min	i.Ü.: 0,56		
	^{86}Rb	18,6d	β^-, γ	1,77; 0,7	1,08
	^{87}Rb	*27,8%*; 5 · 10^{10}a	β^-	*A : 0,12* 0,27	keine γ
	^{88}Rb	18 min	β^-, γ	5,2; 3,3; 2	1,85; 0,91; u. a.
	^{89}Rb	15 min	β^-, γ	3,9; 2,8 u. a.	1,05; 1,26; u. a.
	^{90}Rb	2,7 min	β^-, γ	5,7	
	^{91}Rb	1,7 min	β^-, γ	4,6	
	^{91}Rb	14 min	β^-, γ	3,0	
	^{92}Rb	~ 80s	β^-		
	^{93}Rb	kurz	β^-		
	^{94}Rb	kurz	β^-		
	^{95}Rb	kurz	β^-		
	^{97}Rb	~ 1s	β^-		
38 Strontium	^{81}Sr	29 min	K, β^+		
A = 87,63	^{82}Sr	26d	K, γ		0,95; 0,40; 0,15
σ_a = 1,21	^{83}Sr	33h	β^+,K, γ,	1,2	0,04 − 0,16
σ_s = 10	^{84}Sr	*0,55*		< *3*	
	$^{85}Sr^*$	70 min	i. Ü.: 0,23; K		0,22; 0,15
	^{85}Sr	65d	K, γ		0,51
	^{86}Sr	*9,8*		*A : 1,3*	
	$^{87}Sr^*$	2,8h	i.Ü.: 0,39		
	^{87}Sr	*7,0*			
	^{88}Sr	*82,7*		*A : 0,005*	
	$^{89}Sr^*$	~ 10d	i.Ü.		
	^{89}Sr	54d	β^-	1,46	
	^{90}Sr	28a	β^-	0,54	keine γ
	^{91}Sr	9,7h	β^-, γ	0,61 − 2,67	0,65-1,41
	^{92}Sr	2,6h	β^-, γ	0,55; 1,5	1,37; 0,44; 0,23
	^{93}Sr	8,2 min	β^-		
	^{94}Sr	1,3 min	β^-		
	^{95}Sr	~ 0,7 min	β^-		
	^{97}Sr	kurz	β^-		
39 Yttrium	^{82}Y	70 min	β^+		
A = 88,92	^{83}Y	3,5h			
σ_a = 1,31	^{84}Y	3,7h	β^+,K, γ	2,0	
σ_s = 3	^{85}Y	5h			
	^{86}Y	15h	β^+, γ	1,80; 1,2	1,9; 1; 0,18; 0,6
	$^{87}Y^*$	14h	i.Ü.:0,38		
	^{87}Y	80h	K, β^+, γ	0,7	0,48
	^{88}Y	104d	K, β^+, γ	0,58	1,85; 0,91
	$^{89}Y^*$	16s	i.Ü.: 0,915		
	^{89}Y	*100*		*A : 1,26*	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit [%]* *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt [b]* *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
39 Yttrium Forts.	^{90}Y	64,0h	β^-	2,26	
	^{91}Y*	50 min	i.Ü.: 0,55		
	^{91}Y	58d	β^-, γ	1,54	1,19
	^{92}Y	3,5h	β^-, γ	3,60; 2,7; 1,3	0,94; 0,21-2,4
	^{93}Y	10h	β^-, γ	2,88	0,27
	^{94}Y	17 min	β^-, γ	5,4; 1.4	
	^{95}Y	10 min	β^-		
	^{97}Y	kurz	β^-		
40 Zirkon	^{86}Zr	17h	K, γ		0,24
A = 91,22	^{87}Zr	1,6h	β^+, K, γ	2,10	0,6; 0,3
σ_a = 0,180	^{88}Zr	85d	K, γ		0,39
σ_s = 8	^{89}Zr*	4,4 min	i.Ü. 0,59; K, β^+	0,9; 2,4	0,59; 1,5
	^{89}Zr	79h	K, β^+,	0,90	
	^{90}Zr*	0,8s	i.Ü.: 2,30		
	^{90}Zr	*51,5*		*0,10*	
	^{91}Zr	*11,2*		*1,58*	
	^{92}Zr	*17,1*		*0,25*	
	^{93}Zr	$1,1 \cdot 10^5$ a	β^-	0,056	
	^{94}Zr	*17,4*		*0,08*	
	^{95}Zr	65d	β^-, γ	0,36; 0,39; 0,88	0,75; 0,72
	^{96}Zr	*2,8*		*0,1*	
	^{97}Zr	17h	β^-	1,91; (1,27)	1,4; 1,6; 2,2; 2,6
	^{99}Zr	30s	β^-		
41 Niob	^{89}Nb*	~ 2h	β^+		
A = 92,91	^{89}Nb	1,9h	β^+	2,9	keine γ
σ_a = 1,15	^{90}Nb*	24s	i.Ü.:0,12		
σ_s = 5	^{90}Nb	14,6h	β^+, γ	1,50; 0,65	1,14; 2,23; 0,14
	^{91}Nb*	62d	i.Ü.:0,015; β^+		
	^{91}Nb	lang	K		
	^{92}Nb*	$5,9 \cdot 10^{-6}$ s	i.Ü.:0,09		
	^{92}Nb*	13h	K, γ		2,35
	^{92}Nb	10d	K, γ		0,93; 1,83; 0,90
	^{93}Nb*	12a	i.Ü.:0,03		
	^{93}Nb	*100*		*1,15*	
	^{94}Nb*	6,6 min	i.Ü.:0,041		
	^{94}Nb	$2 \cdot 10^4$ a	β^-, γ	0,5	0,87; 0,70; 1,57
	^{95}Nb*	84h	i.Ü.:0,23		
	^{95}Nb	35d	β^-, γ	0,16	0,76
	^{96}Nb	23h	β^-, γ	0,7; 0,4	0,77; 0,22-1,19
	^{97}Nb*	1 min	i.Ü.:0,75		
	^{97}Nb	72 min	β^-, γ	1,27	0,66
	^{98}Nb	26 min	β^-		
	^{99}Nb	3,8 min	β^-	3,2	
42 Molybdän	^{90}Mo	5,7h	K, β^+, γ	1,2	0,25
A = 95,95	^{91}Mo*	66s	i.Ü.: 0,65; β^+	2,45; 2,78; 3.99	1,54: 1,21
σ_a = 2,7	^{91}Mo	15,6 min	β^+	3,44	keine γ
σ_s = 7	^{92}Mo	*15,9*		$<$ *0,3*	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
42 Molybdän Forts.	^{93}Mo*	6,9h	i.Ü.: 2,43		1,48; 0,69; 0,26
	^{93}Mo	> 2a	K		
	^{94}Mo	*9,1*			
	^{95}Mo	*15,7*		*13,9*	
	^{96}Mo	*16,5*		*1,2*	
	^{97}Mo	*9,5*		*2,2*	
	^{98}Mo	*23,8*		*0,44*	
	^{99}Mo	67h	β^-, γ	1,18; 0,41; 0,80	0,74; 0,04 – 0,78
	^{100}Mo	*9,5*		*0,5*	
	^{101}Mo	14,6 min	β^-, γ	2,2; 1,2	0,08 – 2,08
	^{102}Mo	11 min	β^-		
	^{105}Mo	< 2 min	β^-		
43 Technetium	^{92}Tc	4,3 min	β^+, K	4,1	1,3
	^{93}Tc*	44 min	i.Ü.: 0,39, K		
	^{93}Tc	2,7h	K, β^+, γ	0,80; 0,6	1,3; 1,5; 2,0
	^{94}Tc	53 min	β^+, K, γ	2,41	0,87; 1,85; 3,3; 2,7
	^{95}Tc*	60d	K, i.Ü.: 0,039	0,68; 046	0,20 – 1,0
	^{95}Tc	20h	K, γ		0,76; 1,1
	^{96}Tc*	52 min	i.Ü.: 0,034		
	^{96}Tc	4,3d	K, γ		0,84; 0,77; 0,81
	^{97}Tc*	91d	i.Ü.: 0,097		
	^{97}Tc	$2{,}6 \cdot 10^6$	K		
	^{98}Tc	$1{,}5 \cdot 10^6$	β^-, γ	0,3	0,74; 0,65
	^{99}Tc*	6,0h	i.Ü.: 0,142		
	^{99}Tc	$2{,}1 \cdot 10^5$ a	β^-	0,29	keine γ
	^{100}Tc	16s	β^-, γ	2,8; 3,38; 2,2	0,54; 0,60 u. a.
	^{101}Tc	14 min	β^-, γ	1,32; 1,07	0,30; 0,13 – 0,94
	^{102}Tc	5s	β^-	4,4	
	^{102}Tc	4,5 min	β^-	~ 2	0,47
	^{103}Tc	1,2 min			
	^{104}Tc	18 min	β^-	3,0	
	^{105}Tc	10 min	β^-		
	^{107}Tc	< 1,5 min			
44 Ruthenium $A = 101{,}1$ $\sigma_a = 2{,}56$ $\sigma_s = 6$	^{93}Ru	0,9 min	β^+, γ		
	^{94}Ru	1h	K		
	^{95}Ru	98 min	K, β^+, γ	1,2	0,34; 1,1 u. a.
	^{96}Ru	*5,6*		*A : 0,21*	
	^{97}Ru	2,9d	K,		0,22; 0,33 0,57; 0,11
	^{98}Ru	*1,9*			
	^{99}Ru	*12,7*			
	^{100}Ru	*12,7*			
	^{101}Ru	*17,0*			
	^{102}Ru	*31,5*		*A : 1,44*	
	^{103}Ru	40d	β^-, γ	0,20; 0,13; 0,69	0,05 – 0,61
	^{104}Ru	*18,6*		*0,7*	
	^{105}Ru	4,5h	β^-, γ	1,15	0,73
	^{106}Ru	1,0a	β^-	0,04	keine γ

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungs-typ	*therm. Absorptions-querschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
44 Ruthenium	^{107}Ru	4,5 min	β^-	4,3	
Forts.	^{108}Ru	~ 4 min	β^-		
45 Rhodium	^{97}Rh	35 min	β^+		
A = 102,91	^{98}Rh	9 min	β^+, γ	3,3	0,65
σ_a = 156	^{99}Rh	15 d	β^+, γ		0,353; 0,086
σ_s = 5	^{99}Rh	4,7 h	K, β^+, γ	0,74	0,34; 0.62 u. a.
	^{100}Rh	21 h	K, β^+, γ	2,62; 2,07 u. a.	0,30–2,4
	^{101}Rh	~ 5 a	γ, i.Ü. (?)	0,127	0,198
	^{101}Rh	4,5 d	K, γ		0,30; 0,15
	^{102}Rh	220 d	K, β^-, β^+, γ	β^-: 1,15; β^+: 1,24; 0,76; 0,44	0,12–1,7
	^{103}Rh*	54 min	i.Ü.: 0,040		
	^{103}Rh	*100*		*156*	
	^{104}Rh*	4,4 min	i.Ü.: 0,128		0,051; 0,077
	^{104}Rh	44 s	β^-, γ	2,5	0,55; 1,24
	^{105}Rh*	45 s	i.Ü.: 0,130		
	^{105}Rh	36 h	β^-, γ	0,56; 0,25	0,31
	^{106}Rh	2 h	β^-, γ	0,7	0,2–1,5
	^{106}Rh	30 s	β^-, γ	3,53; 2,44; 3,1	0.51; 0,62 u. a.
	^{107}Rh	24 min	β^-, γ	1,2	0,31; 0,40 u. a.
	^{108}Rh	18 s	β^-, γ	~ 4	
	^{109}Rh	< 1 h	β^-		
46 Palladium	^{98}Pd	17 min	β^+		
A = 106,4	^{99}Pd	24 min	β^+, γ	2,0	0,14; 0,28; 0,42; 0,67
σ_a = 8,0	^{100}Pd	4,0 d	K, γ		0,081; 1,8
σ_s = 3,6	^{101}Pd	8 h	K, β^+	0,5; 2,3	0,29; 0,59 u. a.
	^{102}Pd	*1,0*		*A* : *4,8*	
	^{103}Pd	17 d	K, γ		0,04–0,50
	^{104}Pd	*11,0*			
	^{105}Pd	*22,2*			
	^{106}Pd	*27,3*			
	^{107}Pd*	23 s	i.Ü.: 0,2		
	^{107}Pd	$7 \cdot 10^6$ a	β^-	0,04	
	^{108}Pd	*26,7*		*A* : *10*	
	^{109}Pd*	4,8 min	i.Ü.: 0,17		
	^{109}Pd	13,6 h	β^-	1,0	0,31–0,77
	^{110}Pd	*11,8*		*A* : *0,3*	
	^{111}Pd*	5,5 h	i.Ü.; β^-, γ,		0,16
	^{111}Pd	22 min	β^-	2,14; 3,5	
	^{112}Pd	21 h	β^-, γ	0,28	0,018
	^{113}Pd	1,5 min	β^-		
	^{114}Pd	2,4 min	β^-		keine γ
	^{115}Pd	45 s	β^-		
47 Silber	^{102}Ag	16 min	β^+		
A = 107,880	^{103}Ag	1,1 h	β^+, K, γ,	1,3	0,76; 0,55
σ_a = 63	^{104}Ag	1,2 h	β^+, K		
σ_s = 6	^{104}Ag	27 min	β^+, γ	2,70	0,55; 0,12

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotope	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp*	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
47 Silber Forts.	^{105}Ag	40 d	K, γ		0,34; 0,28 u. a.
	^{106}Ag	24 min	β^+,K, γ	1,96; 1,45	0,51
	^{106}Ag	8,3 d	K, γ		0,51; 0,22-2,66
	^{107}Ag*	44 s	i.Ü.: 0,093		
	^{107}Ag	*51,4*		*31*	
	^{108}Ag	2,3 min	β^-,K, γ	β^-:1,77	0,62; 0,43; 0,60
	^{109}Ag*	40 s	i.Ü.: 0,088		
	^{109}Ag	*48,6*		*87*	
	^{110}Ag*	270 d	β^-, i.Ü.0,12 γ	0,53; 0,1	0,66; 0,12−1,5
	^{110}Ag	24 s	β^-, γ	2,22; 2,88	0,66
	^{111}Ag*	75 s	i.Ü.		$\sim$ 0,087
	^{111}Ag	7,5 d	β^-, γ	1,04; 0,7; 0,8	0,34; 0,247
	^{112}Ag	3,2 h	β^-, γ	3,5; 4,1; 2,7;1	0,62; 1,1−2,8
	^{113}Ag*	1,2 min	β^-	< 2	0,14−0,7
	^{113}Ag	5,3 h	β^-	2,0	0,31
	^{114}Ag*	5 s	β^-	4,6	0,57
	^{114}Ag	2 min	β^-		
	^{115}Ag*	$\sim$ 20 s	β^-		
	^{115}Ag	21 min	β^-, γ	2,9	0,14 0,23
	^{116}Ag	2,5 min	β^-	5,0	0,70; 0,52
	^{117}Ag	1,1 min	β^-		
48 Cadmium $A = 112{,}41$ $\sigma_a = 2450$ $\sigma_s = 7$	^{104}Cd	59 min	K, γ		0,067;0,084;0,12
	^{105}Cd	55 min	K, β^+, γ	1,69	0,025−2,32
	^{106}Cd	*1,22*		*A : 1,0*	
	^{107}Cd	6,7 h	K, β^+, γ	0,32	0,85
	^{108}Cd	*0,88*			
	^{109}Cd	1,3 a	K, L		
	^{110}Cd	*12,4*		*A : 0,2*	
	^{111}Cd*	49 min	i.Ü.: 0,395		
	^{111}Cd	*12,8*			0,247; 0,150
	^{112}Cd	*24,0*		*A : 0,030*	
	^{113}Cd*	5,1 a	β^-	0,58	
	^{113}Cd	*12,3*		*20000*	
	^{114}Cd	*28,8*		*A : 1,24*	
	^{115}Cd*	43 d	β^-, γ	1,63;	0,94; 1,30; 0,49
	^{115}Cd	54 h	β^-, γ	1,11; 0,58	0,52; 0,94; 1,3
	^{116}Cd	*7,6*		*A : 1,5*	
	^{117}Cd*	3,0 h	i.Ü.		
	^{117}Cd	50 min	β^-, γ		1,3; 0,27-2,0
	^{118}Cd	50 min	β^-		
	^{119}Cd	10 min	β^-		
	^{119}Cd	2,9 min	β^-		
49 Indium $A = 114{,}82$ $\sigma_a = 196$ $\sigma_s = 2{,}2$	^{107}In	30 min	K β^+, γ	2	0,22
	^{108}In*	50 min	β^+, i. Ü.	2,3	
	^{108}In	40 min	β^+	3,5	0,64
	^{109}In*	< 2 min	i. Ü.		0,66
	^{109}In	4,3 h	K, β^+, γ	0,80	0,058; 0,63;
	^{110}In*	5,0 h	K, i.Ü. 0,12		0,66; 0,88; 0,94
	^{110}In	66 min	β^+,K, γ	2,25	0,66
	^{111}In	2,8 d	K, γ		0,247;0,172

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
49 Indium Forts.	$^{112}In^*$	21 min	i.Ü. 0,155		
	^{112}In	14 min	β^-, K, β^+	β^-: 0,66; β^+: 1,52	
	^{113}In	*4,2*		*A : 58*	
	$^{113}In^*$	1,73 h	i.Ü.: 0,39		
	$^{114}In^*$	49 d	i.Ü.: 0,19; K		0,72; 0,56
	^{114}In	72 s	β^-, K,	1,98	1,30
	$^{115}In^*$	4,5 h	i.Ü.: 0,33; β^-	0,83	
	^{115}In	*95,8*		*A : 207*	
		$6 \cdot 10^{14}$ a	β^-	0,63	
	$^{116}In^*$	54,0 min	β^-, γ	1,00; 0,87; 0,60	1,3; 1,1; 2,1; 1,5
	^{116}In	13 s	β^-	3,3	keine γ
	$^{117}In^*$	1,9 h	β^-, i.Ü. 0,31	1,77; 1,62	0,16; 0,31
	^{117}In	1,1 h	β^-, γ	0,74	0,56; 0,16
	^{118}In	4,5 min	β^-, γ	1,5	
	^{118}In	5,5 s	β^-	4,4	
	^{119}In	18 min	β^-	2,7	keine γ
50 Zinn	^{108}Sn	9 min	K		
A = 118,70	^{109}Sn	18 min	K, β^+, γ	~ 1,6	0,34 – 1,12
σ_a = 0,625	^{110}Sn	4 h	K, γ		0,28
σ_s = 4	^{111}Sn	35 min	K, β^+	1,51	
	^{112}Sn	*1,02*		*A : 1,3*	
	^{113}Sn	112 d	K, L, γ		0,26
	^{114}Sn	*0,69*			
	^{115}Sn	*0,38*			
	^{116}Sn	*14,3*		*A : 0,006*	
	^{117}Sn	*7,6*			
	$^{117}Sn^*$	14 d	i.Ü.: 0,32		0,162
	^{118}Sn	*24,1*		*A : 0,010*	
	^{119}Sn	*8,5*			
	$^{119}Sn^*$	275 d	i.Ü.: 0,089		0,065; 0,024
	^{120}Sn	*32,5*		*A : 0,14*	
	$^{121}Sn^*$	> 1 a	β^-	0,42	
	^{121}Sn	27 h	β^-	0,38	keine γ
	^{122}Sn	*4,8*		*A : 0,16*	
	^{123}Sn	130 d	β^-	1,42	keine γ
	^{123}Sn	40 min	β^-, γ	1,26	0,15
	^{124}Sn	*6,1*		*A : 0,2*	
	^{125}Sn	9,5 min	β^-, γ	2,1; 1,2	0,33; 1,4
	^{125}Sn	10 d	β^-, γ	2,4	0,23–2,0
	^{126}Sn	50 min	β^-		
	^{127}Sn	2,1 h	β^-		
	^{128}Sn	57 min	β^-		
	^{130}Sn	2,6 min	β^-		
	^{131}Sn	3,4 min	β^-		
	^{132}Sn	2,2 min	β^-		

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
51 Antimon	^{115}Sb	60 min	β^+, γ	0,75; 1,10	0,06; 0,09
A = 121,76	^{116}Sb	15 min	β^+, γ	2,4	1,30; 0,9; 2,2
σ_a = 5,7	^{116}Sb	60 min	β^+, γ	1,4	1,31; 0,9; 0,41
σ_s = 4,3	^{117}Sb	2,8 h	K, γ,		0,16
	^{118}Sb	3,5 min	β^+, i.Ü.	3,1	0,11
	^{118}Sb	5,1 h	K, γ		0,26; 1,03; 1,22
	^{119}Sb	38 h	K, γ		0,024
	^{120}Sb	5,8 d	K		0,09 – 1,18
	^{120}Sb	16,4 min	β^+, γ, K	1,70	1,18
	^{121}Sb	*57*		*5,9*	
	^{122}Sb*	3,5 min	i.Ü.: 0,136		0,060; 0,075
	^{122}Sb	2,8 d	β^-, K, γ	1,4; 1,98; 0,73	0,56; 0,7 – 1,2
	^{123}Sb	*43*		*4,1*	
	^{124}Sb*	21 min	β^-, i.Ü.: 0,019		
	^{124}Sb*	1,3 min	β^-, i.Ü.: 0,012	3,2	
	^{124}Sb	60 d	β^-, γ	0,61; 2,32; 0,24	0,60 – 2,11
	^{125}Sb	2 a	β^-, γ	0,30; 0,12; 0,62	0,43; 0,170; 0,60
	^{126}Sb	9 h	β^-, γ	1	~ 0,4; 0,9
	^{126}Sb	28 d	β^-	1,9	
	^{127}Sb	93 h	β^-, γ	0,86; 1,57; 1,11	0,058 – 0,76
	^{128}Sb	10,3 min	β^-	2,9	0,32; 0,75
	^{128}Sb	9,6 h	β^-		
	^{129}Sb	4,2 h	β^-, γ	0,92 – 1,87	0,16 – 0,78
	^{130}Sb	10 min	β^-, γ	2,9	0,19 – 0,76
	^{130}Sb	40 min	β^-, γ		
	^{131}Sb	22 min	β^-	1,1	
	^{132}Sb	2 min	β^-		
	^{133}Sb	4,4 min	β^-		
	^{134}Sb	0,8 min	β^-		
52 Tellur	^{116}Te	1,4 h	β^+, γ	2,4	0,75
A = 127,61	^{117}Te	2,5 h	β^+	2,5	
σ_a = 4,7	^{118}Te	6,0 d	K		
σ_s = 5	^{119}Te	4,5 d	K, γ,		1,6
	^{120}Te	*0,091*		*70*	
	^{121}Te*	150 d	γ, i.Ü.: 0,296		0,082; 0,214
	^{121}Te	17 d	K, γ,		0,57; 0,51
	^{122}Te	*2,5*		*2,8*	
	^{123}Te*	104 d	γ, i.Ü.: 0,248		0,089; 0,159
	^{123}Te	*0,88*		*410*	
	^{124}Te	*4,6*		*6,8*	
	^{125}Te*	58 d	γ, i.Ü.: 0,145		0,110; 0,035
	^{125}Te	*7,0*		*1,56*	
	^{126}Te	*18,7*		*0,8*	
	^{127}Te*	110 d	i.Ü.: 0,089; β^-		0,059; 0,67
	^{127}Te	9,3 h	β^-	0,68	
	^{128}Te	*31,8*		*0,3*	
	^{129}Te*	33 d	i.Ü.: 0,106		
	^{129}Te	72 min	β^-, γ	1,46; 1,01; 0,29	0,03; 0,45; 1,08

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
52 Tellur	^{130}Te	*34,4*		*0,5*	
Forts.	^{131}Te*	30h	β⁻, i. Ü. 0,18	0,4–2,5	0,77; 0,05–1,6
	^{131}Te	25 min	β⁻, γ	2,1; 1,7; 1,35	0,15–1,14
	^{132}Te	77h	β⁻, γ	0,22	0,23
	^{133}Te*	63 min	i. Ü.		0,33
	^{133}Te	2 min	β⁻, γ	1,4; 2,4	0,6; 1,0
	^{134}Te	44 min	β⁻		
53 Jod	^{119}J	18 min	β⁺	4,0	
A = 126,91	^{120}J	1,4h	K		
σ_a = 7,0	^{121}J	2h	β⁺, γ	1,2	0,210
σ_s = 3,6	^{122}J	3,5 min	β⁺	3,12	keine γ
	^{123}J	13h	K, γ		0,16
	^{124}J	4,5d	K, β⁺, γ	2,20	0,60; 1,7; 2,0;
	^{125}J	60d	K, L, γ		0,035
	^{126}J	13,3d	K, β⁻, γ	0,87; 1,25; 0,39	0,38; 0,65; 0,74
	^{127}J	*100*		*7,0*	
	^{128}J	25,0 min	β⁻, K, γ	2,12; 1,67; 1,13	0,45; 0,54–0,98
	^{129}J	$1,7 \cdot 10^7$a	β⁻, γ	0,15	0,038
	^{130}J	12,6h	β⁻, γ	1,02; 0,60	0,74; 0,66; 0,53
	^{131}J	8,05d	β⁻, γ	0,61; 0,33; 0,25	0,080–0,72
	^{132}J	2,3h	β⁻, γ	0,9–2,12	0,53–2,2
	^{133}J	21h	β⁻, γ	1,3; 0,4	0,53; 0,85; 1,4
	^{134}J	52 min	β⁻, γ	1,5; 2,5	0,86; 1,1; 1,8
	^{135}J	6,7h	β⁻, γ	1,0; 0,5; 1,4	1,3; 1,8; 1,14
	^{136}J	86s	β⁻, γ	6,4; 5,0; 3,6	1,4; 2,8
	^{137}J	22s	β⁻ (n)		
	^{138}J	5,9s	β⁻		
	^{139}J	2,7s	β⁻		
54 Xenon	^{121}Xe	40 min	β⁺, γ		0,096
A = 131,30	^{122}Xe	19h	K, γ		0,18; 0,23
σ_a = 35	^{123}Xe	1,8h	K, β⁺, γ	1,7	0,15
σ_s = 4,3	^{124}Xe	*0,094*		*74*	
	^{125}Xe*	55s	γ, i.Ü.		0,110; 0,075
	^{125}Xe	18h	K, γ		0,054–0,46
	^{126}Xe	*0,092*			
	^{127}Xe*	75s	γ, i.Ü.		0,125; 0,175
	^{127}Xe	36,4d	K, γ		0,057–0,36
	^{128}Xe	*1,92*		*< 5*	
	^{129}Xe	*26,4*		*45*	
	^{129}Xe*	8d	γ, i. Ü.: 0,236		0,040; 0,196
	^{130}Xe	*4,1*		*< 5*	
	^{131}Xe	*21,2*		*120*	
	^{131}Xe*	12d	i. Ü.: 0,164		
	^{132}Xe	*26,9*		*A: 0,2*	
	^{133}Xe*	2,3d	i. Ü.: 0,233		
	^{133}Xe	5,27d	β⁻, γ	0,35	0,081
	^{134}Xe	*10,4*		*A: 0,2*	
	^{135}Xe*	15 min	i. Ü.		0,53

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
54 Xenon	^{135}Xe	9,2 h	β^-, γ	0,91; 0,54	0,25; 0,62; 0,37
Forts.	^{136}Xe	*8,9*		*A: 0,15*	
	^{137}Xe	3,8 min	β^-, γ	3,5	
	^{138}Xe	17 min	β^-, γ	2,4	0,42; 0,51;
	^{139}Xe	41 s	β^-		
	^{140}Xe	16 s	β^-		
	^{141}Xe	3 s	β^-		
	^{143}Xe	1 s	β^-		
	^{144}Xe	~ 1 s	β^-		
55 Cäsium	^{123}Cs	6 min	β^+		
A = 132,91	^{125}Cs	45 min	K, β^+, γ	2,05	0,111
σ_a = 29,0	^{126}Cs	1,6 min	β^+, K, γ	3,8	0,38
σ_s = 20	^{127}Cs	6,2 h	K, β^+, γ	1,06; 0,7	0,41; 0,125; 0,287
	^{128}Cs	3,8 min	β^+, γ	3,0; 2,5; 1,5	0,13; 0,45; 0,98
	^{129}Cs	31 h	K, ν		0,38; 0,56
	^{130}Cs	30 min	β^+, β^-, K	β^+: 1,97; β^-: 0,44	keine γ
	^{131}Cs	9,7 d	K, L		keine γ
	^{132}Cs	6,2 d	K, γ		0,67; 1,27; 1,10
	^{133}Cs	*100*		*29,0*	
	^{134}Cs*	3,1 h	i.Ü. 0,137 β^-	0,55	0,010; 0,127
	^{134}Cs	2,3 a	β^-, γ	0,65; 0,083; 0,683	
	^{135}Cs	$3{,}0 \cdot 10^6$ a	β^-	0,21	0,60; 0,80;
	^{136}Cs	13 d	β^-, γ	0,34; 0,66	keine γ
	^{137}Cs	30 a	β^-	0,52; 1,18	0,067 – 2,5
	^{138}Cs	32 min	β^-, γ	3,40	1,43; 1,0; 0,46;
	^{139}Cs	9,5 min	β^-		
	^{140}Cs	66 s	β^-		
	^{141}Cs	kurz	β^-		
	^{142}Cs	~ 1 min	β^-		
	^{143}Cs	kurz	β^-		
	^{144}Cs	kurz	β^-		
56 Barium	^{126}Ba	97 min	K, γ		0,22; 0,70
A = 137,36	^{127}Ba	12 min	β^+		
σ_a = 1,2	^{128}Ba	2,4 d	K, γ		0,27
σ_s = 8	^{129}Ba	1,9 h	β^+	1,6	
	^{130}Ba	*0,101*		*A: 10*	
	^{131}Ba	11,6 d	K, γ		0,055 – 1,04
	^{132}Ba	*0,097*		*A: 7*	
	^{133}Ba*	39 h	i. Ü.: 0,288		0,276; 0,012
	^{133}Ba	7,2 a	K, γ		0,36; 0,081; 0,30
	^{134}Ba	*2,42*		*2.2*	
	^{135}Ba	*6,6*		*5,8*	
	^{135}Ba*	29 h	i. Ü.: 0,268		
	^{136}Ba	*7,8*		*0,4*	
	^{137}Ba	*11,3*		*5,1*	
	^{137}Ba*	2,60 min	i. Ü.: 0,662		
	^{138}Ba	*71,7*		*0,7*	
	^{139}Ba	85 min	β^-, γ	2,22; 0,8; 2,38	0,165; 1,43

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
56 Barium	^{140}Ba	12,8 d	β⁻, γ	1,02; 0,48;	0,54; 0,31; 0,44
Forts.	^{141}Ba	18 min	β⁻, γ	2,8	
	^{142}Ba	6 min	β⁻		
	^{143}Ba	< 0,5 min	β⁻		
	^{144}Ba	kurz	β⁻		
57 Lanthan	^{131}La	58 min	β⁺	1,6	
A = 138,92	^{132}La	4,5 h	β⁺, γ	3,5	1,0
σ_a = 9,3	^{133}La	4 h	K, β⁺, γ	1,2	0,8
σ_s = 15	^{134}La	6,5 min	K, β⁺	2,7	keine γ
	^{135}La	19 h	K, γ		0,1−1,6
	^{136}La	9 min	K, β⁺	2,1	
	^{137}La	$6\cdot10^{4}$ a	K		keine γ
	^{138}La	*0,089%*; $1\cdot10^{11}$ a	K, β⁻, γ	0,21	1,4; 0,8
	^{139}La	*99,911*		*A*: *8,2*	
	^{140}La	40,2 h	β⁻, γ	0,4−2,2	1,60; 0,11−2,9
	^{141}La	3,8 h	β⁻, γ	2,43; 0,9	~1,5
	^{142}La	77 min	β⁻, γ	> 2,5	0,63; 2,4; 0,87
	^{143}La	~ 19 min	β⁻		
	^{144}La	kurz	β⁻		
58 Cer	^{131}Ce	30 min	β⁺	4,2	
A = 140,13	^{132}Ce	4,2 h	β⁺		
σ_a = 0,73	^{133}Ce	6,3 h	K, β⁺, γ	1,3	1,8
σ_s = 9	^{134}Ce	72 h	K		keine γ
	^{135}Ce	22 h	K, β⁺	0,8	
	^{136}Ce	*0,19*		*25*	
	^{137}Ce*	35 h	i. Ü.: 0,26		
	^{137}Ce	9 h	K, γ		0,44
	^{138}Ce	*0,26*		*9*	
	^{139}Ce*	55 s	i. Ü.: 0,75		
	^{139}Ce	140 d	K, γ		0,165
	^{140}Ce	*88,47*		*0,66*	
	^{141}Ce	32 d	β⁻, γ	0,43; 0,57	0,145
	^{142}Ce	*11,08*		*1,0*	
	^{143}Ce	33 h	β⁻, γ	1,13; 1,40; 0,50	0,29; 0,06−1,10
	^{144}Ce	285 d	β⁻, γ	0,30; 0,175	0,03−0,14; 0,70−2,18
	^{145}Ce	3,0 min	β⁻, γ	2,0	
	^{146}Ce	14 min	β⁻, γ	0,7	0,32; 0,05−0,22
59 Praseodym	^{135}Pr	22 min	β⁺, γ	2,5	0,30; 0,22; 0,08
A = 140,92	^{136}Pr	70 min	β⁺, γ	2,0	0,17; 0,8; 1,1
σ_a = 11,6	^{137}Pr	1,4 h	K, β⁺	1,8	keine γ
σ_s = 4,0	^{138}Pr	2,0 h	K, β⁺, γ	1,4	0,3−1,7
	^{139}Pr	4,5 h	K, β⁺, γ	1,0	1,3; 1,6
	^{140}Pr	3,4 min	β⁺, K	2,3	keine γ
	^{141}Pr	*100*		*11,6*	
	^{42}Pr	19,1 h	β⁻, γ	2,16; 0,6	1,59

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
59 Praseodym Forts.	^{143}Pr	13,8 d	β^-	0,92	keine γ
	^{144}Pr	17 min	β^-, γ	2,98; 0,8; 2,3	0,06; 0,7−2,2
	^{145}Pr	5,9 h	β^-, γ	1,7	keine γ
	^{146}Pr	24 min	β^-, γ	3,7; 2,3	0,46; 1,49; 0,75
60 Neodym $A = 144{,}27$ $\sigma_a = 46$ $\sigma_s = 16$	^{138}Nd	22 min	β^+	2,4	
	^{139}Nd	5,5 h	K, β^+, γ	3,1	1,3
	^{140}Nd	3,3 d	K		
	^{141}Nd	2,4 h	K, β^+, γ	0,7	1,14; 1,30
	^{142}Nd	*27,1*		*18*	
	^{143}Nd	*12,2*		*324*	
	^{144}Nd	*23,9*%;		*5,0*	
	^{145}Nd	*8,3*		*60*	
	^{146}Nd	*17,2*		*10*	
	^{147}Nd	11,6 d	β^-, γ	0,81; 0,37; 0,23	0,092; 0,12−0,69
	^{148}Nd	*5,7*		*3,4*	
	^{149}Nd	1,8 h	β^-, γ	1,5	0,11; 0,03−0,65
	^{150}Nd	*5,6*		*3,0*	
	^{151}Nd	15 min	β^-, γ	1,9	0,08−1,14
61 Promethium	^{141}Pm	20 min	β^+	2,6	
	^{142}Pm	~ 30 s	β^+, K		
	^{143}Pm	270 d	K, γ		0,95
	^{144}Pm	300 d	K, γ		0,7; 0,4; 0,2
	^{145}Pm	16 d	β^+	0,45	
	^{145}Pm	18 a	K, L, γ		0,068; 0,073
	^{146}Pm	~ 1 a	β^-	0,7	
	^{147}Pm	2,6 a	β^-	0,23	
	^{148}Pm	5,3 d	β^-, γ	2,5	0,8
	^{148}Pm	42 d	β^-, γ	0,6; 2,4	1
	^{149}Pm	50 h	β^-, γ	1,05	0,29; 1,3
	^{150}Pm	2,7 h	β^-, γ	2,0; 3,0	0,34; 0,82
	^{151}Pm	27 h	β^-, γ	1,1	0,34; 0,06−1,5
62 Samarium $A = 150{,}35$ $\sigma_a = 5600$	^{142}Sm	72 min	β^+		
	^{143}Sm	8 min	β^+	2,3	
	^{144}Sm	*3,1*		*A* : < 2	
	^{145}Sm	1,0 a	K, γ		0,061
	^{146}Sm	$5 \cdot 10^7$ a	α	2,5	
	^{147}Sm	*15,0*%		*87*	
		$1{,}3 \cdot 10^{11}$ a	α	2,18	
	^{148}Sm	*11,2*			
	^{149}Sm	*13,8*		*40 800*	
	^{150}Sm	*7,4*			
	^{151}Sm	80 a	β^-, γ	0,076	0,020
	^{152}Sm	*26,8*		*224*	
	^{153}Sm	47 h	β^-, γ	0,71; 0,64; 0,81	0,102; 0,069
	^{154}Sm	*22,7*		*A* : *5,5*	
	^{155}Sm	23 min	β^-, γ	1,8	0,25; 0,105
	^{156}Sm	9 h	β^-	0,9	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit [%]* *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt [b]* *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
63 Europium	^{144}Eu	18 min	β^+	2,4	
A = 152,0	^{145}Eu	5 d	K, γ		0,6; 0,73; 0,89
σ_a = 4300	^{146}Eu	38 h	K		
σ_s = 8	^{147}Eu	24 d	K, γ	α: 2,9 (10^{-3} %)	0,21; 0,12
	^{148}Eu	54 d	K, γ		0,57
	^{149}Eu	120 d	K, γ		~ 0,4
	^{150}Eu	14 h	β^-	1,1	keine γ
	^{151}Eu	*47,8*		*7700*	
	^{152}Eu	9,3 h	β^-, K, γ	1,88	0,12 – 1,3
	^{152}Eu	13 a	K, β^-, γ	0,70; 1,46; 0,36	0,12; 0,34; 1,1
	^{153}Eu	*52,2*		*450*	
	^{154}Eu	16 a	β^-, γ	0,15 – 1,84	0,123 – 1,28
	^{155}Eu	1,7 a	β^-, γ	0,15; 0,25	0,019 – 0,137
	^{156}Eu	15 d	β^-, γ	0,4; 2,4	0,089; 0,20
	^{157}Eu	15 h	β^-, γ	~ 1,0; ~ 1,7	0,6; 0,2
	^{158}Eu	60 min	β^-, γ	2,6	
	^{159}Eu ?	20 min	β^-		
64 Gadolinium	^{147}Gd	29 h	K, γ		0,136 – 1,30
A = 157,26	^{148}Gd	~ 130 a	α	3,2	
σ_a = 46 000	^{149}Gd	9 d	K, γ	α: 3,0 (7·10^{-4} %)	0,11 – 0,94
	^{150}Gd	> 10^5 a	α	2,7	
	^{151}Gd	~ 150 d	K, γ		0,022 – 0,31
	^{152}Gd	*0,20*		*A : < 125*	
	^{153}Gd	236 d	K, γ		0,070 – 0,103
	^{154}Gd	*2,15*			
	^{155}Gd	*14,7*		*61000*	
	^{156}Gd	*20,5*			
	^{157}Gd	*15,7*		*240 000*	
	^{158}Gd	*24,9*		*A : 4*	
	^{159}Gd	18 h	β^-, γ	0,95; 0,60	0,36; 0,057;
	^{160}Gd	*21,9*		*A : 0,8*	
	^{161}Gd	3,7 min	β^-, γ	1,6	0,057 – 0,526
65 Terbium	^{149}Tb	4,1 h	K, α	3,95	
A = 158,93	^{150}Tb	19 h	α, K	α: 3,4 (3 · 10^{-4} %)	0,11 – 0,29
σ_a = 46	^{153}Tb	2,6 d	K, γ		0,04 – 0,25
	^{154}Tb	8 h	K		
	^{154}Tb	17,2 h	K, β^+, γ	2,75; 1,66	0,2 – 0,6
	^{155}Tb	5,6 d	K, γ		0,019 – 0,37
	^{156}Tb	5 h	i. Ü., K, ?	0,14	0,088
	^{156}Tb	5 d	K, β^-, γ	0,2; 0,6	0,09 – 0,42
	^{159}Tb	*100*		*46*	
	^{160}Tb	72 d	β^-, γ	0,56; 0,85; 0,37	0,09 – 1,27
	^{161}Tb	7 d	β^-, γ	0,55; 0,45; 0,41	0,049; 0,08
	^{162}Tb	14 min			
	^{163}Tb	6,5 h			
	^{164}Tb	23 h			

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
66 Dysprosium	^{149}Dy	8 min	K		
A = 162,51	$<^{153}$Dy	7 min	α	4,6	
σ_a = 950	$<^{153}$Dy	19 min	α	4,1	
σ_s = 100	^{152}Dy	2,3 h	α	3,6	
	^{153}Dy	5 h	α	3,48	
	^{154}Dy	13 h	α	3,37	
	^{155}Dy	10 h	K		0,07–0,27
	^{156}Dy	*0,052*			
	^{157}Dy	8,2 h	K, γ		0,06; 0,14; 0,32
	^{158}Dy	*0,090*			
	^{159}Dy	134 d	K, L		0,058
	^{160}Dy	*2,29*			
	^{161}Dy	*18,9*			
	^{162}Dy	*25,5*			
	^{163}Dy	*25,0*			
	^{164}Dy	*28,2*		*A: (2600)*	
	^{165}Dy*	1,3 min	i.Ü.: 0,108		
	^{165}Dy	2,32 h	β^-, γ	1,25; 0,88; 0,42	0,09–1,0
	^{166}Dy	82 h	β^-	0,3	
67 Holmium	^{156}Ho	~ 1 h			0,14
A = 164,94	^{159}Ho	33 min	K		0,12; 0,18; 0,31
σ_a = 65	^{160}Ho*	5 h	i.Ü. 0,060		
	^{160}Ho	28 min	K, γ		0,09–0,97
	^{161}Ho	2,5 h	K, γ		0,026; 0,078; 0,10
	^{162}Ho	67 min	K		0,038–0,29
	^{163}Ho	0.8 s	K, γ		0,305
	^{164}Ho	37 min	K, β^-	0,99	0,073; 0,091
	^{165}Ho	*100*		*65*	
	^{166}Ho	> 30 a	β^-, γ	0,18; 0,28; 1,1	0,081–0,84
	^{166}Ho	27,2 h	β^-, γ	1,85 ; 1,76	0,081; 1,4–1,6
	^{167}Ho	3,0 h	β^-, γ	0,28; 0,96	0,35; 0,70
	^{169}Ho	1,6 h	β^-		
68 Erbium	^{160}Er	29 h	K		keine γ
A = 167,27	^{161}Er	3 h	K, β^+, γ	1,2	0,065; 0,82; 1,12
σ_a = 173	^{162}Er	*0,136*			
σ_s = 15	^{163}Er	75 min	K, γ		0,43; 1,10
	^{164}Er	*1,54*			
	^{165}Er	10 h	K		
	^{166}Er	*33,4*			
	^{167}Er*	2,5 s	i.Ü. 0,208		
	^{167}Er	*22,9*			
	^{168}Er	*27,1*		*A: 2,0*	
	^{169}Er	9,4 d	β^-	0,33	keine γ
	^{170}Er	*14,9*		*A: 9*	
	^{171}Er	7,5 h	β^-, γ	1,11; 1,52	0,30; 0,11
	^{172}Er	50 h	β^-		

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
69 Thulium	^{165}Tm	25 h	K, γ		0,20; 0,81; 1,16;
A = 168,94	^{166}Tm	7,7 h	K	β+: 2,1 (0,5 %)	0,08–0,78
σ_a = 127	^{167}Tm	9,6 d	K, γ		0,05; 0,20; 0,72;
σ_s = 7	^{168}Tm	87 d	K, γ		0,08–0,82
	^{169}Tm	*100*		*127*	
	^{170}Tm	129 d	β−, γ	0,97; 0,89	0,084
	^{171}Tm	1,9 a	β−	0,10	keine γ
	^{172}Tm	2,6 d	β−	1,5	0,08; 1,1; 1,5; 1,8
70 Ytterbium	^{166}Yb	54 d	K, γ		0,112; 0,140
A = 173,04	^{167}Yb	74 min	β+	2,4	
σ_a = 37	^{167}Yb	18 min	K, γ		0,118
σ_s = 12	^{168}Yb	*0,14*		*A : (11000)*	
	^{169}Yb	32 d	K, γ		0,0084–0,308
	^{170}Yb	*3,03*			
	^{171}Yb*	kurz			0,076
	^{171}Yb	*14,3*			
	^{172}Yb	*21,8*			
	^{173}Yb	*16,2*			
	^{174}Yb	*31,8*		*A : 60*	
	^{175}Yb	4,2 d	β−, γ	0,47; 0,07; 0,36	0,40; 0,28; 0,113
	^{176}Yb	*12,7*		*A : 5,5*	
	^{177}Yb	2,0 h	β−, γ	1,30	0,146; 0,119
71 Cassiopeium	^{169}Cp	~ 2 d	K		
od. Lutetium	^{170}Cp	1,7 d	K, γ		0,084; 0,194
(Lu)	^{171}Cp	8,5 d	K, γ		0,056; 0,067; 0,076
A = 174,99	^{171}Cp	1,6 a	K, γ		~ 1
σ_a = 112	^{172}Cp	4,0 h	β+	1,2	
	^{172}Cp	6,7 d	K, γ		0,03–0,37
	^{173}Cp	1,4 a	K, γ		0,079–0,27
	^{174}Cp	165 d	K, γ, β−	0,6	0,077; 0,265
	^{175}Cp	*97,40*		*A : 35*	
	^{176}Cp*	3,7 h	β−, γ	1,2	0,089
	^{176}Cp	*2,60*		*A : 4000*	
		3 · 10^{10} a	β−, γ	0,42	0,31; 0,20; 0,089
	^{177}Cp	6,8 d	β−, γ	0,50; 0,18; 0,39	0,07–0,32
	^{178}Cp	19 min	β−		0,342; 0,445
72 Hafnium	^{170}Hf	1,8 h	β+	2,4	keine γ
A = 178,50	^{171}Hf	16 h	K. γ		0,18; 1,4
σ_a = 105	^{172}Hf	~ 5 a	K, γ		0,8; 0,3
σ_s = 8	^{173}Hf	24 h	K, γ		0,12; 0,30
	^{174}Hf	*0,18*		*1500*	
	^{175}Hf	70 d	K, γ		0,343; 0,089;
	^{176}Hf	*5,2*		*15*	0,113–0,432
	^{177}Hf	*18,5*		*380*	
	^{178}Hf*	4,8 s	i.Ü. 1,149; γ		0,09; 0,21; 0,33; 0,34
	^{178}Hf	*21,1*		*75*	
	^{179}Hf	*13,8*		*65*	
	^{179}Hf*	19 s	γ, i.Ü.: 0,37		0,16; 0,22
	^{180}Hf	*35,2*		*14*	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
72 Hafnium Forts.	^{180}Hf*	5,5h	γ, i.Ü. 1,14		0,44; 0,50
	^{181}Hf	46d	β^-, γ	0,41	0,13−0,61
	^{183}Hf	64 min	β^-, γ	1,4	
73 Tantal	^{176}Ta	8,0h	K, γ		0,088; 0,202
A = 180,95	^{177}Ta	2,2d	K, γ		0,11 − 1,07
σ_a = 21,3	^{178}Ta	9,3 min	K, β^+, γ	1,1	0,93; 1,35
σ_s = 5	^{178}Ta	2,1h	K, β^+, γ	~ 1	0,088−0,427
	^{179}Ta	~ 600d	K		
	^{180}Ta	*0,012*			
	^{180}Ta*	8,1h	K, γ, β^-	0,70; 0,61	0,093; 0,102
	^{181}Ta	*99,988*		*21,3*	
	Ta*	0,33s	i.Ü.: < 0,2		
	^{182}Ta*	16 min	i.Ü.: 0,18; β^-	0,6	0,18
	^{182}Ta	112d	β^-, γ	0,51; 0,44; 0,36	1,1; 1,2
	^{183}Ta	5,2d	β^-, γ	0,62	0,04–0,41
	^{184}Ta	8,7h	β^-, γ	1,26; 0,15	0,40; 0,89; 024;
	^{185}Ta	49 min	β^-, γ	1,7; 0,15	0,18; 0,13; 0,24
	^{186}Ta	10 min	β^-, γ	2,2	0,20; 0,73;
74 Wolfram	^{176}W	1,3h	K, γ	β^+: ~ 2 (0,5 %)	1,3
A = 183,86	^{177}W	2,2h	K, γ		0,5; 1,2
σ_a = 19,2	^{178}W	21d	K		
σ_s = 5	^{179}W	30 min	K		0,03
	^{179}W	5,2 min	K. od. i.Ü.		
	^{180}W	*0,14%*;		*60*	
	^{180}W*	0,005s	γ, i.Ü.		0,35; 0,22
	^{181}W	140d	K, L, γ		0,137; 0,153
	^{182}W	*26,2*		*20*	
	^{183}W	*14,3*		*11*	
	^{183}W*	5,5s	γ, i.Ü.		0,105; 0,155
	^{184}W	*30,7*		*2,0*	
	^{185}W*	1,7 min	γ, i.Ü.		0,13; 0,16
	^{185}W	74d	β^-	0,43	
	^{186}W	*28,7*		*35*	
	^{187}W	24h	β^-, γ	0,62; 1,31	0,072–0,87
	^{188}W	65d	β^-		
75 Rhenium	^{177}Re	17 min	β^+		
A = 186,22	^{178}Re	15 min	β^+		
σ_a = 86	^{180}Re	20 h	β^+	1,9	
σ_s = 14	^{180}Re	18 min	K		0,227; 0,282
	^{180}Re	2,4 min	β^+, γ	1,1	0,11; 0,88
	^{181}Re	20 h	K		0,047−0,95
	^{182}Re	13h	K, γ		0,066−1,231
	^{182}Re	64h	K, γ		0,020−1,231
	^{183}Re	71d	K, γ		0,041−0,41
	^{184}Re	50d	K, γ		0,11−0,90
	^{184}Re	2,2d	K. od. i.Ü.		0,04; :0,16
	^{185}Re	*37,1*		*104*	
	^{186}Re	91h	β^-,K, γ	1,07; 0,93	0,137
	^{187}Re	*62,9*		*66*	
		~ $5\cdot10^{10}$a	β^-	< 0,008	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
75 Rhenium	^{186}Re*	20 min	γ, i. Ü.		0,06; 0,10
Forts.	^{188}Re	17 h	β^-, γ	2,12; 1,96	0,155
	^{189}Re	~ 200 d	β^-, γ	0,2	1
	^{190}Re	3 min	β^-, γ	1,7	0,19; 0,37; 0,56
	^{191}Re	10 min	β^-	1,8	
76 Osmium	^{181}Os	23 min	K, γ		0,166; 0,174
A = 190,2	^{182}Os	24 h	K, γ		0,509
σ_a = 15,3	^{183}Os*	10 h	i. Ü.; K, γ		0,17; 1,10; 0,067
σ_s = 11	^{183}Os	15 h	K, γ		0,11 – 0,89
	^{184}Os	*0,018*		*A* : < *200*	
	^{185}Os	95 d	K, L, γ		0,65
	^{186}Os	*1,59*			
	^{187}Os	*1,64*			
	^{187}Os*	35 h	i. Ü.		
	^{188}Os	*13,3*			
	^{189}Os*	6 h	i. Ü.		0,30
	^{189}Os	*16,1*			
	^{190}Os	*26,4*		*A* : *8*	
	^{190}Os*	9 min	γ, i. Ü.: 0,62		0,19 – 0,56
	^{191}Os*	14 h	i. Ü.: 0,074		
	^{191}Os	16 d	β^-	0,14	0,042; 0,129
	^{192}Os	*41,0*		*A* : *1,6*	
	^{193}Os	31 h	β^-, γ	1,14; 1,06	0,14 – 0,56
	^{194}Os	~ 2 a	β^-		
	^{195}Os	6,5 min	β^-	2	
77 Iridium	^{185}Ir	15 h	K, γ		0,04 – 0,25
A = 192,2	^{186}Ir	15 h	K, γ, β^+		0,14 – 0,92
σ_a = 440	^{187}Ir	12 h	K, γ		0,026 – 0,98
	^{188}Ir	41 h	K, γ	β^+: 2 (0,3 %)	0,63; 0,15; 0,48
	^{189}Ir	11 d	K, γ		0,03–0,1; 0,24
	^{190}Ir	3 h	K, β^+, γ	2,0	0,19; 0,36; 0,62
	^{190}Ir	11 d	K, γ		0,19 – 1,33
	^{191}Ir	*38,5*		*A* : *960*	
	^{191}Ir*	5 s	γ, i. Ü.: 0,171		0,04; 0,129
	^{192}Ir*	1,4 min	i. Ü.: 0,057		0,31; 0,47;
	^{192}Ir	74 d	β^-, K, γ	0,67	0,136–1,16
	^{193}Ir*	11,9 d	i. Ü. 0,08		
	^{193}Ir	*61,5*		*A* : *130*	0,33; 0,64;
	^{194}Ir	19 h	β^-, γ	2,24; 1,91; 0,98	0,29 – 2,0
	^{195}Ir	2,3 h	β^-, γ	1,2; 2,1	0,42; 0,66;
					0,88; > 1
	^{196}Ir	9,7 d	β^-, γ	0,08	0,58; 0,76; ~ 1
	^{197}Ir	7 min	β^-, γ	1,6	1,8
	^{198}Ir	50 s	β^-, γ	3,6	0,78
78 Platin	^{186}Pt	3 h	K		
A = 195,09	^{188}Pt	10 d	K, γ		0,192; 0,40; 0,28;
σ_a = 8,8	^{189}Pt	11 h	K, γ		0,14; 0,55; 0,70
σ_s = 10	^{190}Pt	*0,012*		*150*	
		$6 \cdot 10^{11}$ a	α	3,3	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
78 Platin Forts.	^{191}Pt	3,0d	K, γ		0,53; 0,36; 0,41
	^{192}Pt	*0,78*		*8*	0,54;
	^{193}Pt*	3,4d	i.Ü.: 0,148		0,136; 0,013
	^{193}Pt	lang	L		
	^{194}Pt	*32,8*		*1,2*	
	^{195}Pt	*33,7*		*27*	
	^{195}Pt*	3,5d	γ, i.Ü.:0,260		0,099;0,031;0,13
	^{196}Pt	*25,4*		*0,7*	
	^{197}Pt*	1,4h	i.Ü.		0,34
	^{197}Pt	19h	β^-	0,670	0,077; 0,191
	^{198}Pt	*7,2*		*4,0*	
	^{199}Pt	30 min	β^-, γ	0,8; 1,1; 1,3; 1,7	0,07 – 0,96
	^{200}Pt	11,5 h	β^-		
79 Gold	$\leq{}^{187}$Au	4,3 min	K, β^+	α: 5,1 (0,5 ‰)	
A = 197,0	^{186}Au	~ 15 min	K		
σ_a = 98,8	^{188}Au	~ 10 min			
σ_s = 9,3	^{189}Au	42 min	K, γ		0,29; 0,14
	^{191}Au	3h	K, γ		0,30; 0,046–0,6
	^{192}Au	4,8d	K, β^+, γ	1,9	0,317; 0,296;
	^{193}Au*	4s	γ, i.Ü.:0,290		0,03; 0,82; 0,258
	^{193}Au	17h	K, γ	γ: 0,11; 0,17;	0,19; 0,10 – 0,44
	^{194}Au	39h	K, β^+, γ	1,55; 1,22	0,33; 0,29;
	^{195}Au*	30s	γ,i.Ü.;0,318		0,056; 0,261
	^{195}Au	180d	K, γ		0,10; 0,03; 0,14
	^{196}Au	14h	K oder i.Ü.		
	^{196}Au	5,6d	K, β^-, γ	0,27	0,354; 0,331
	^{197}Au	*100*		*98,8*	
	^{197}Au*	7,4s	γ, i.Ü. 0,409		0,13: 0,279
	^{198}Au	2,70d	β^-, γ	0,96; 0,28; 1,37	0,41; 0,68,1,09
	^{199}Au	3,15d	β^-, γ	0,30; 0,25; 0,46	0,158; 0,208
	^{200}Au	48 min	β^-, γ	2,2; 0,6	0,39; 1,13
	^{201}Au	26 min	β^-, γ	1,5	0,55
	^{202}Au	~ 25s	β^-		
	^{203}Au	55s	β^-, γ	1,9	0,69
80 Quecksilber	$<{}^{185}$Hg	0,7 min	α	5,6	
A = 200,61	$<{}^{192}$Hg	~ 3h			
σ_a = 380	^{189}Hg	25 min	K, γ		0,029
σ_s = 20	^{190}Hg	90 min	K		
	^{191}Hg	57 min	K, γ		0,253; 0,274
	^{192}Hg	6h	K, β^+, γ	1,2	0,031 – 0,275
	^{193}Hg*	10h	K, i.Ü. 0,14		0,03 – 1,6
	^{193}Hg	5h	K, γ		0,038; 0,57 – 0,92
	^{194}Hg	0,4s	γ, i.Ü.(?)		0,048; 0,134
	^{194}Hg	~130d	K		
	^{195}Hg*	40h	K, γ, i.Ü.: 0,160		0,26; 0,47; 0,56
	^{195}Hg	9,5h	K, γ		0,18; 0,60; 0,78; 1,15

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
80 Quecksilber	^{196}Hg	*0,15*		*(3100)*	
Forts.	^{197}Hg	25h	i.Ü.: 0,297 K, γ		0,134; 0,16; 0,28
	^{197}Hg	65h	K, γ		0,077; 0,191
	^{198}Hg	*10,1*		*(2500)*	
	^{199}Hg	*16,9*			
	^{199}Hg*	43 min	i.Ü.: 0,526		0,158
	^{200}Hg	*23,1*		*< (60)*	
	^{201}Hg	*13,2*		*< (60)*	
	^{202}Hg	*29,8*		*3,8*	
	^{203}Hg	48d	β⁻, γ	0,21	0,279
	^{204}Hg	*6,8*		*0,43*	
	^{205}Hg	5,5 min	β⁻, γ	1,6	0,20
81 Thallium	^{195}Tl	3,5s	i.Ü.		0,099; 0,38; 0,39
A = 204,39	^{195}Tl	1,2h	K		0,037
σ_a = 3,4	^{196}Tl	1,8 h	K, γ		0,43
σ_s = 14	^{197}Tl*	0,54s	γ, i.Ü.		0,38; 0,22
	^{197}Tl	2,8h	K, γ		0,152; 0,17; 0,13
	^{198}Tl*	1,9h	K, γ, i.Ü.: 0,54		0,28; 0,049; 0,44−0,64
	^{198}Tl	5h	K, γ		0,19−1,20
	^{199}Tl	7,4h	K, γ		0,050−0,49
	^{200}Tl	27h	K, γ		0,116−1,52
	^{201}Tl	3,0d	K, γ		0,167;0,135;0,031
	^{202}Tl	12d	K, L, γ		0,44
	^{203}Tl	*29,5*		*11,4*	
	^{204}Tl	4,1a	β⁻,K	0,76	keine γ
	^{205}Tl	*70,5*		*0,80*	
	^{206}Tl	4,20 min	β⁻	1,51	keine γ
	^{207}Tl	4,78 min	β⁻, γ	1,45	0,89
	^{208}Tl	3,1 min	β⁻, γ	1,79	2,615; 0,58; 0,51
	^{209}Tl	2,2 min	β⁻, γ	1,99	0,12; 0,45; 1,56
	^{210}Tl	1,32 min	β⁻, γ	1,9	0,30; 0,78; 2,36
82 Blei	^{195}Pb	17 min	K		
A = 207,21	^{196}Pb	37 min	K		
σ_a = 0,170	^{197}Pb	42 min	K,γ,i.Ü.0,234		0,22; 0,23; 0,39
σ_s = 11	^{198}Pb	2,3h	K, γ		0,12−0,42
	^{199}Pb	12 min	i.Ü.: 0,42		
	^{199}Pb	1,5h	K, γ		0,37; 0,35; 0,72
	^{200}Pb	21h	K, γ		0,033−0,45
	^{201}Pb*	1,0 min	i.Ü.: 0,63		
	^{201}Pb	9h	K, γ		0,13−1,10
	^{202}Pb*	3,5h	i.Ü.: 2,17, γ, K,		0,13−0,96
	^{202}Pb	3·10⁵a	L		
	^{203}Pb*	6s	i.Ü.: 0,83		
	^{203}Pb	52h	K, γ		0,28; 0,40; 0,68
	^{204}Pb	*1,3*		*0,8*	
	^{204}Pb*	68 min	γ, i.Ü.: 2,19		0,37; 0,62; 0,90
	^{205}Pb	~ 5 · 10⁷ a	L		
	^{206}Pb	*26*		*0,025*	
	^{207}Pb	*21*		*0,70*	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt* [*b*] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
82 Blei Forts.	^{207}Pb*	0,80s	i. Ü. 1,63, γ		0,57; 1,06
	^{208}Pb	*52*		*< 0,03*	
	^{209}Pb	3,3h	β⁻	0,62	keine γ
	^{210}Pb	20a	β⁻, γ	0,020	0,047
	^{211}Pb	36,1 min	β⁻, γ	1,4; 0,5	0,83; 0,06–0,76
	^{212}Pb	10,64h	β⁻, γ	0,34; 0,58	0,2386; 0,11–0,41
	^{214}Pb	26,8 min	β⁻, γ	0,7	0,053 – 0,35
83 Wismut	$<^{198}$Bi	1,7 min	α	6,2	
$A = 209{,}00$	^{198}Bi	7 min	K, α	5,83	
$\sigma_a =$ 0,034	^{199}Bi	~ 25 min	K, α	5,47	
$\sigma_s =$ 9	^{200}Bi	35 min	K		
	^{201}Bi	1,0h	K		
	^{201}Bi	~ 2h	K		
	^{202}Bi	1,6h	K		0,422; 0,961
	^{203}Bi	12h	K, γ		0,06 – 1,9
	^{204}Bi	12h	K, γ		0,08 – 1,21
	^{205}Bi	14d	K, γ		0,11 – 2,60
	^{206}Bi	6,4d	K, γ		0,107 – 1,72
	^{207}Bi	8,0a	K, L, γ		0,57; 1,064; 1,77
	^{208}Bi	~ $3 \cdot 10^4$ a	K		2,61
	^{209}Bi	*100*		*0,034*	
	^{210}Bi	$2{,}6 \cdot 10^6$a	α	4,94	
	^{210}Bi	5,0d	β⁻	1,17	keine γ
	^{211}Bi	2,15 min	α, γ	6,62; 6,27	0,35
	^{212}Bi	60,5 min	β⁻: 64 %	2,25	0,73; 083
			α: 36 %	6,05; 6,09	0,04
	^{213}Bi	47 min	β⁻: 98%	1,39; 0,96;	0,43
			α: 2 %	5,9	
	^{214}Bi	19,7 min	β⁻, γ	1,51; 1,0 u. a.	0,61 – 2,43
	^{215}Bi	8 min	β⁻		
84 Polonium	^{176}Po	1,9 min	α	6,14	
	^{197}Po	~ 4 min	α	6,04	
	^{198}Po	~ 6 min	α	5,94	
	^{199}Po	~ 11 min	α	5,85	
	^{200}Po	~ 8 min	K, α	5,77	
	^{201}Po	18 min	K, α	5,67	
	^{202}Po	56 min	K, α (2 %)	5,59	
	^{203}Po	47 min	K		
	^{204}Po	3,8h	K, α (1 %)	5,37	
	^{205}Po	1,5h	K, α (1 ‰)	5,2	
	^{206}Po	9d	K, α (5 %)	5,22	0,060 – 1,3
	^{207}Po	5,7h	K		0,99; 0,74; 0,41
	^{208}Po	2,9a	α	5,11	

Ordnungszahl, Elementname	Isotop	*Häufigkeit* % *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungs-typ	*therm. Absorptions-querschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
84 Polonium Forts.	^{209}Po	103 a	α,K (5 ‰)	4,88	0.91; 0,26
	^{210}Po	138,40 d	α, γ	5,30	0,80
	^{211}Po*	25 s	α	7,1; 8,70; 7,85	1,06; 0,57
	^{211}Po	0,52 s	α, γ	7,43	0,89; 0,57
	^{212}Po	0,30 μs	α	8,78	
	^{213}Po	4 μs	α	8,34	
	^{214}Po	160 μs	α	7,68	
	^{215}Po	0,0018 s	α	7,36	
	^{216}Po	0,16 s	α	6,77	
	^{217}Po	< 10 s	α	6,5	
	^{218}Po	3,05 min	α	6,00	
85 Astatin	< ^{202}At	43 s	α	6,50	
	< ^{203}At	1,7 min	α	6,35	
	^{203}At	7 min	α	6,10	
	^{204}At	~ 25 min	K		
	^{205}At	25 min	K, α	5,90	
	^{206}At	2,6 h	K		
	^{207}At	1,8 h	K, α (10 %)	5,75	
	^{208}At	1,7 h	K, α (5 ‰)	5,65	0,18; 0,66
	^{208}At	6 h	K		
	^{209}At	5,5 h	K, α (5 %)	5,64	0,78; 0,55; 0,20
	^{210}At	8,3 h	K, α (1,7 ‰)	5,35; 5,52; 5,44	0,047 – 2,23
	^{211}At	7,5 h	K, α	5,86	0,67
	^{212}At	0,22 s	α		
	^{213}At	< 2 s	α	9,2	
	^{214}At	~ 2 · 10⁻⁶ s	α	8,78	
	^{215}At	~ 10⁻⁴ s	α	8,00	
	^{216}At	~ 300 μs	α	7,79	
	^{217}At	0,018 s	α	7,02	
	^{218}At	~ 1,3 s	α	6,63	
	^{219}At	0,9 min	α, β⁻ (3 %)	α: 6,27	
86 Radon	^{204}Rn	3 min	α	6,3	
	^{206}Rn	7 min	α,K (35 %)	6,22	
	^{207}Rn	11 min	α,K	6,12	
	^{208}Rn	23 min	K, α (20 %)	6,14	
	^{209}Rn	30 min	K, α (17 %)	6,04	
	^{210}Rn	2,7 h	α,K (4 %)	6,04	
	^{211}Rn	16 h	K, α (26 %)	5,78; 5,85; 5,61	0,07; 0,17; 0,23
	^{212}Rn	23 min	α	6,26	
	^{215}Rn	~ 1 μ s	α	8,6	
	^{216}Rn	~ 100 μ s	α	8,01	
	^{217}Rn	~ 0,001 s	α	7,74	
	^{218}Rn	0,019 s	α, γ	7,13; 6,53 (2 %)	0,61
	^{219}Rn	3,92 s	α, γ	6,82; 6,56; 6,42	0,27; 0,40
	^{220}Rn	52 s	α	6,28; 5,75	0,54
	^{221}Rn	25 min	β⁻, α (20 %)	α: 6,0	
	^{222}Rn	3,825 d	α	5,48	
87 Francium	^{212}Fr	19 min	K, α (44 %)	6,39; 6,41; 6,34	
	^{217}Fr	< 2 s	α	8,3	
	^{218}Fr	5 · 10⁻³ s	α	7,85	

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitte* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
87 Francium Forts.	^{219}Fr	0,02 s	α	7,30	
	^{220}Fr	28 s	α	6,69	
	^{221}Fr	4,8 min	α, γ	6,33; 6,12	0,22
	^{222}Fr	15 min	β⁻, α (1 ‰)		
	^{223}Fr	22 min	β⁻, γ	1,1; 1,3	0,05; 0,08; 0,21
88 Radium	^{213}Ra	2,7 min	α	6,90	
	^{219}Ra	~ 10^{-3} s	α	8,0	
	^{220}Ra	~ 0,03 s	α	7,43	
	^{221}Ra	30 s	α	6,71	
	^{222}Ra	38 s	α, γ	6,55	0,33
	^{223}Ra	11,6 d	α, γ	5,70; 5,60; 5,53	0,026 – 0,44
	^{224}Ra	3,64 d	α, γ	5,68; 5,44	0,24
	^{225}Ra	14,8 d	β⁻, γ	0,32	0,040
	^{226}Ra	1620 a	α, γ	4,78; 4,59	0,187
	^{227}Ra	41 min	β⁻, γ	1,30	0,29; 0,50
	^{228}Ra	6,7 a	β⁻	< 0,02	
	^{229}Ra	< 5 min	β⁻		
	^{230}Ra	1 h	β⁻	1,2	
89 Aktinium	^{221}Ac	< 2 s	α	7,6	
	^{222}Ac	5,5 s	α	6,96	
	^{223}Ac	2,2 min	α, K (1 %)	6,64	
	^{224}Ac	2,9 h	K, α (10 %)	6,17	
	^{225}Ac	10,0 d	α, γ	5,82; 5,78; 5,72	0,036 – 0,187
	^{226}Ac	29 h	β⁻, K (20 %)	1,2	0,23; 0,16; 0,25; 0,18
	^{227}Ac	22 a	β⁻, α (1 %)	β⁻: 0,046 α: 4,94	
	^{228}Ac	6,13 h	β⁻, γ	1,11; 0,45–2,18	0,058 – 1,64
	^{229}Ac	66 min	β⁻		
	^{230}Ac	< 1 min	β⁻	2,2	
90 Thorium	^{223}Th	0,1 s	α	7,5	
A = 232,05	^{224}Th	~ 1 s	α	7,13	
σ_a = 7,56	^{225}Th	8 min	α, K (10 %)	6,57	
σ_s = 12,5	^{226}Th	31 min	α, γ	6,34; 6,23; 6,10	0,11; 0,24;
	^{227}Th	18,2 d	α, γ	5,97; 5,65–6,03	0,03 – 0,34
	^{228}Th	1,90 a	α, γ	5,42; 5,34	0,084; 0,21; 0,13
	^{229}Th	7300 a	α	4,85; 4,94; 5,02	0,20; 0,15
	^{230}Th	$8 \cdot 10^4$ a	α, γ	4,68; 4,61	0,068; 0,14–0,26
	^{231}Th	25,6 h	β⁻, γ	0,30; 0,22; 0,13	0,017 – 0,31
	^{232}Th	*100*		*7,56*	
		$1,39 \cdot 10^{10}$ a	α, γ	3,99; 3,93	0,06
	^{233}Th	23,3 min	β⁻, γ	1,23	
	^{234}Th	24,10 d	β⁻, γ	0,19; 0,10	0,093; 0,064; 0,03
	^{235}Th	< 5 min	β⁻		

Ordnungszahl, chem. Atomgewicht A, therm. Wirkungsquerschnitte des natürl. Isotopengem.	Isotop	*Häufigkeit %* *bzw.* Halbwertzeit	Umwandlungstyp	*therm. Absorptionsquerschnitt [b]* *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
91 Protaktinium	^{225}Pa	2,0s	α		
	^{226}Pa	1,8 min	α	6,81	
	^{227}Pa	38 min	α, K (15 %)	6,46	
	^{228}Pa	22h	K,α, (2 %)	6,09; 5,85	0,058 – 0,158
	^{229}Pa	1,5d	K, α (2 ‰)	5,69	
	^{230}Pa	17d	K, β^- (15 %)	0,40	0,94; 1,01; 0,76
	^{231}Pa	34 000a	α, γ	5,00; 4,63–5,05	0,30; 0,027
	^{232}Pa	1,31d	β^-, γ	0,26; 0,37; 1.24	0,047 – 1,153
	^{233}Pa	27,4d	β^-, γ	0,26; 0,14; 0,57	0,31; 0,016 – 2,42
	^{234}Pa*	1,18 min	β^-,i. Ü.0,6%	2,31; 1,5; 0,6	0,23 – 1,8
	^{234}Pa	6,66h	β^-, γ	0,32; 0,53; 0,16	0,04 – 1,7
	^{235}Pa	24 min	β^-	1,4	keine γ
	^{237}Pa	10 min	β^-		
92 Uran	^{227}U	1,3 min	α	6,8	
A = 238,07	^{228}U	9,3 min	K, α (20 %)	6,67	
σ_a = 7,68	^{229}U	58 min	K, α (20 %)	6,42	
σ_s = 8,3	^{230}U	21d	α, γ	5,89; 5,82; 5,66	0,07; 0,16; 0,23
	^{231}U	4,3d	K γ		0,018 – 0,22
	^{232}U	74a	α, γ	5,32; 5,26; 5,13	0,058; 0,130;
	^{233}U	$1,62 \cdot 10^5$a	α, γ	4,82; 4,78; 4,73	0,044; 0,050;
	^{234}U	*0,0055*		*97*	
		$2,50 \cdot 10^5$a	α, γ	4,78; 4,72	0,05 – 0,117
	^{235}U	26,5 min	i.Ü.		0,000075
	^{235}U	*0,72*		*689*	
		$7,1 \cdot 10^8$a	α, γ	4,4; 4,58	0,19; 0,15
	^{236}U	$2,39 \cdot 10^7$a	α, γ	4,50	0,05
	^{237}U	6,75d	β^-, γ	0,248	0,027 – 0,43
	^{238}U	*99,27*		*2,71*	
		$4,51 \cdot 10^9$a	α, γ	4,18	0,048
	^{239}U	23,5 min	β^-, γ	1,21	0,074
	^{240}U	14h	β^-	0,36	keine γ
93 Neptunium	^{231}Np	50 min	α	6,28	
	^{232}Np	~ 13 min	K, γ		
	^{233}Np	35 min	K		
	^{234}Np	4,4d	K, L, β^+, γ	β^+: 0,8 (1/2 ‰)	0,04 – 7,57
	^{235}Np	1,1a	K	α: 5,06 (10^{-3} %)	
	^{236}Np	22h	β^-,K, L	0,52	0,044; 0,045
	^{236}Np	> 5000a	β^-		
	^{237}Np	$2,2 \cdot 10^6$a	α, γ	4,79; 4,52–4,87	0,087; 0,029
	^{238}Np	2,10d	β^-, γ	1,26; 0,27	0,044; 0,99; 1,03
	^{239}Np	2,33d	β^-, γ	0,33 – 0,72	0,045 – 0,49
	^{240}Np	7,3 min	β^-, γ	2,16; 1,59; 1,26	0,56; 0,91; 1,4
	^{240}Np	60 min	β^-, γ	0,90	0,16 – 1,16

Ordnungszahl, Elementname	Isotop	*Häufigkeit* °/₀ *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungs-typ	*therm. Absorptions-querschnitt* [b] *bzw.* α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
94 Plutonium	^{232}Pu	36 min	K, α (2 %)	6,58	
	^{233}Pu	20 min	K	α: 6,3 (1 °/₀₀)	
	^{234}Pu	9h	K, α (6 %)	6,19	
	^{235}Pu	26 min	L,K	α: 5,85 (10^{-3} %)	
	^{236}Pu	2,7a	α	5,76; 5,72	0,047; 0,11; 0,16
	^{237}Pu*	0,18 s	i.Ü. 0,145		
	^{237}Pu	45d	K, γ		0,06; 0,03; 0,044
	^{238}Pu	90a	α, γ	5,49; 5,45	0,044; 0,1; 0,15
	^{239}Pu	24300a	α, γ	5,15; 5,14; 5,10	0,052; 0,0125
	^{240}Pu	6600a	α, γ	5,16; 5,12	0,045
	^{241}Pu	13a	β^-	0,021	0,1; 0,145
	^{242}Pu	$3,8 \cdot 10^5$a	α	4,90; 4,85	
	^{243}Pu	5,0h	β^-, γ	0,57; 0,48	0,085
	^{244}Pu	$8 \cdot 10^7$a	α		
	^{245}Pu	11h	β^-		
	^{246}Pu	11d	β^-, γ	0,15; 0,33	0,047; 0,027
95 Americium	^{237}Am	~ 1h	K	α: 6,01 (10^{-3} %)	
	^{238}Am	1,9h	K, γ		0,98; 0,58
	^{239}Am	12h	K, γ	α: 5,78 (10^{-3} %)	0,045 – 0,28
	^{240}Am	47h	K, γ		1,02; 1,40; 0,92
	^{241}Am	470a	α, γ	5,48; 5,38–5,54	0,060; 0,026
	^{242}Am*	16,0h	β^-,K (19 %)	0,625; 0,667	0,042; 0,044
	^{242}Am	~ 100a	β^-, K (10 %)	0,59	
	^{243}Am	7950a	α, γ	5,27; 5,22;	0,075
	^{244}Am	26 min	β^-	1,5	keine γ
	^{245}Am	2,0h	β^-, γ	0,90	0,26; 0,03 – 0,23
	^{246}Am	25 min	β^-, γ	1,31; 1,60; 2,10	1,07; 0,80; 0,24
96 Curium	^{238}Cm	2,5h	K, α (10 %)	6,50	
	^{239}Cm	~ 3h	K		0,188
	^{240}Cm	27d	α	6,25	
	^{241}Cm	35d	K, α (1 %)	5,95	0,47; 0,59
	^{242}Cm	163d	α, γ	6,11; 6,07	0,044; 0,102; 0,157
	^{243}Cm	35a	α, γ	5,78; 5,73; 5,99	0,23; 0,28; 021;
	^{244}Cm	18a	α, γ	5,80; 5,76	0,043
	^{245}Cm	11 000a	α, γ	5,34; 5,45	0,131; 0,17
	^{246}Cm	4000a	α	5,36	
	^{247}Cm	$> 4 \cdot 10^7$ a		0,9	
	^{248}Cm	$4 \cdot 10^5$a	α, f (11 %)	5,05	
	^{249}Cm	64 min	β^-	0,9	
	^{250}Cm	$2 \cdot 10^4$a	f		
97 Berkelium	^{243}Bk	4,5h	K, α (1 °/₀₀)	6,55; 6,72; 6,20	0,74; 0,84; 0,96
	^{244}Bk	4,4h	K, γ	6,66	0,20; 0,90
	^{245}Bk	5,0d	K, α (1 °/₀₀)	6,17; 6,33; 5,90	0,25; 0,38
	^{246}Bk	1,8d	K, γ		0,82; 1,1
	^{247}Bk	7000a	α, γ	5,50; 5,67; 5,30	0,085; 0,26
	^{248}Bk	~ 18h	β^-,K (30 %)	0,67	
	^{249}Bk	290d	β^-, γ	0,09	
	^{250}Bk	3,1h	β^-, γ	0,9; 1,9	1,0

Ordnungszahl, Elementname	Isotop	*Häufigkeit* [%] *bzw.* Halbwertszeit	Umwandlungs-typ	α-, β-Energie [MeV]	γ-Energie [MeV]
98 Kalifornium	^{244}Cf	25 min	α	7,17	
	^{245}Cf	44 min	K, α (30 %)	7,11	
	^{246}Cf	36h	α, γ	6,75; 6,71	0,044;0,10;0,15
	^{247}Cf	2,5h	K, γ		0,29; 0,42; 0,46
	^{248}Cf	350d	α	6,26	
	^{249}Cf	360a	α, γ	5,81; 5,7−6,2	0,40; 0,34
	^{250}Cf	10a	α, γ	6,02; 5,98	0,043
	^{251}Cf	~ 800a	α, γ		
	^{252}Cf	2,2a	α, f (3 %)	6,11; 6,07;	0,042
	^{253}Cf	18d	β^-	0,27	
	^{254}Cf	56d	f		
99 Einsteinium	^{246}Es	7,3 min	α,K	7,35	
	^{248}Es	25 min	K,α (3 ‰)	6,87	
	^{249}Es	2h	K, α (1 ‰)	6,76	
	^{250}Es	8 h	K		
	^{251}Es	1,5d	K, α (5 ‰)	6,48	
	^{252}Es	~ 150d	α	6,64	
	^{253}Es	20d	α, γ	6,64; 6,18−6,59	0,042; 0,054;
	^{254}Es	37h	β^-,K (1 ‰)	1,1	0,68
	^{254}Es	1,3a	α	6,44	0,062
	^{255}Es	24d	β^-		
	^{256}Es	kurz	β^-		
100 Fermium	^{250}Fm	30 min	α	7,43	
	^{251}Fm	7 h	K, α (1 %)	6,89	
	^{252}Fm	30h	α	7,04	
	^{253}Fm	3d	K, α (11 %)	6,9	
	^{254}Fm	3,4h	α, γ	7,22; 7,18; 7,08	0,042; 0,098
	^{255}Fm	20h	α	7,03	0,055; 0,088
	^{256}Fm	3,1h	f		
101Mendelevium	^{256}Md	~ 30 min	K		
102 Nobelium(?)	^{254}No	3 s	α		

Absorptionsquerschnitte, Aktivierungsquerschnitte *(A)* und Spaltquerschnitte schwerer Isotope ($Z \geq 88$)

gegenüber thermischen Neutronen (2200 m/s) oder Reaktorneutronen (*)

Isotop	Absorptions-querschnitt [b]	Spalt-querschnitt [b]
$^{223}_{88}$Ra	A: 130*	< 100
$^{224}_{88}$Ra	A: 12*	
$^{226}_{88}$Ra	A: 20*	< 0,0001
$^{228}_{88}$Ra	A: 36*	< 2
$^{227}_{89}$Ac	510	< 2
$^{227}_{90}$Th		1500
$^{228}_{90}$Th	A: 123*	≤ 0,3
$^{229}_{90}$Th		45
$^{230}_{90}$Th	27	≤ 0,001
$^{232}_{90}$Th	7,56	< 0,0002
$^{233}_{90}$Th	A: 1400*	15
$^{234}_{90}$Th	A: 1,8*	< 0,01
$^{230}_{91}$Pa		1500
$^{231}_{91}$Pa	A: 200	0,01
$^{232}_{91}$Pa	A: 760*	700
$^{233}_{91}$Pa	A: 68	< 0,1
$^{234}_{91}$Pa		≤ 500
$^{230}_{92}$U		25
$^{231}_{92}$U		400
$^{232}_{92}$U	A: 300*	80
$^{233}_{92}$U	581	527
$^{234}_{92}$U	97	≤ 0,65
$^{235}_{92}$U	694	582
$^{236}_{92}$U	7	
$^{238}_{92}$U	2,71	≦ 0,0005
$^{239}_{92}$U	A: 22*	14*
$^{234}_{93}$Np		900
$^{236}_{93}$Np		2800
$^{237}_{93}$Np	170	19
$^{238}_{93}$Np		1600
$^{239}_{93}$Np	A: 60	< 3
$^{236}_{94}$Pu		160
$^{247}_{94}$Pu		2000
$^{238}_{94}$Pu	A: 403	16,6
$^{239}_{94}$Pu	1026	746
$^{240}_{94}$Pu	295	< 0,1
$^{241}_{94}$Pu	1400	1025
$^{242}_{94}$Pu	30	< 0,2
$^{243}_{94}$Pu	A: 170*	
$^{244}_{94}$Pu	1,8*	
$^{245}_{94}$Pu	260*	
$^{241}_{95}$Am	630	3,1
$^{242}_{42}$Am		2500
$^{242}_{95}$Am	8000*	6400*
$^{243}_{95}$Am	A: 74	< 0,075
$^{242}_{96}$Cm	A: 20*	< 5*
$^{243}_{96}$Cm	500*	700
$^{244}_{96}$Cm	A: 15*	
$^{245}_{96}$Cm	A: 200*	1900
$^{246}_{96}$Cm	A: 15*	
$^{248}_{96}$Cm	A: 6*	
$^{249}_{97}$Bk	A: 500*	
$^{249}_{98}$Cf	900*	600*
$^{250}_{98}$Cf	A: 1500*	
$^{251}_{98}$Cf	A: 3000*	
$^{252}_{98}$Cf	A: 30*	
$^{254}_{98}$Cf	A: < 2*	
$^{253}_{99}$Es	A: 300*	
$^{254}_{99}$Es	A: 2700*	

Weltbeste Daten der spaltbaren Kerne s. S. 703

Mechanische Eigenschaften der Elemente

Element	Dichte bei 20 °C, g/cm³	Schmelzpunkt, °C	Siedepunkt, °C	Spez. Wärme bei 20 °C cal/(g) (°C)	Lin. Ausdehnungskoeffizient bei 20 °C, pro °C × 10^{-6}	Therm. Leitfähigkeit bei 20° C, cal/(sec)(cm)(°C)	Spez. Widerstand bei T °C Mikro-Ohm cm		Kristallstruktur*	Atomradien n. Goldschmidt Å
Aktinium	...	1600	...	...	...	...	...		...	...
Aluminium	2,699	600,2	2327	0,215	23,8	0,503	2,655	(20 °C)	KF	1,43
Americium	...	...	...	...	...	...	...		...	...
Antimon	6,62	630,5	1440	0,049	8,5 – 10,8	0,045	39,0	(0 °C)	R	1,61
Argon	1,6626 × 10^{-3}	− 189,4	− 185,8	0,125	...	0,406 × 10^{-4}	...		KF	1,92
Arsen	5,73	814	610	0,082	4,7	...	35	(0 °C)	R	(1,25)
Barium	3,5	704	1640	0,068	...	...	...		KR	2,24
Beryllium	1,85	1315	2970	0,43	11,6	0,38	5,9	(0 °C)	HD	1,13
Blei	11,34	327,4	1740	0,031	29,3	0,083	20,65	(20 °C)	KF	1,75
Bor	2,3	2000 – 2300	2550	0,263	8,3	...	1,8 × 10^{-6}	(0 °C)	T-H	0,97
Brom	3,12	− 7,2	58	0,070	...	...	...		O	(1,19)
Cadmium	8,65	321	765	0,055	31,8	0,22	7,51	(18 °C)	HD	1,52
Calcium	1,55	850	1440	0,149	22	0,3	3,43	(0 °C))	KF	1,97
Cer	6,78	780	2420	0,043	...	...	75–90	(20 °C)	KF	1,82
Cäsium	1,9	28	690	0,052	97	...	18,83	(0 °C)	KR	2,70
Chlor	...	-101	–34,7	0,116	...	0,172 × 10^{-4}	...		T	(1,07)
Chrom	7,19	1890	2500	0,11	6,2	0,16	13	(28 °C)	KR	1,28
Curium	...	...	...	...	...	...	...		...	...
Dysprosium	8,56	1400	...	...	...	...	...		HD	1,77
Eisen	7,87	1539	2740	0,11	11,7	0,18	9,71	(20 °C)	KR	1,28
Erbium	9,16	> 1440	...	...	...	...	...		HD	1,75
Europium	5,22	...	...	...	...	...	...		KR	2,04
Fluor	...	–223	–188,2	0,18	...	...	...		...	...
Francium	...	...	...	...	...	...	...		...	...
Gadolinium	7,95	~ 1200	...	...	...	...	...		HD	1,80

Element	Dichte bei 20 °C, g/cm³	Schmelzpunkt, °C	Siedepunkt, °C	Spez. Wärme bei 20 °C cal/(g) (°C)	Lin. Ausdehnungskoeffizient bei 20 °C, pro °C × 10^{-6}	Therm. Leitfähigkeit bei 20°C, cal/(sec) (cm)(°C)	Spez. Widerstand bei T °C Mikro-Ohm cm		Kristallstruktur*	Atomradien n. Goldschmidt, Å
Gallium	5,91	29,78	2070	0,079	18	...	53,4	(0 °C)	EFO	2,7
Germanium	5,36	958	...	0,073	...	...	89000	(0°C)	DG	1,39
Gold	19,32	1063	2970	0,031	14,2	0,71	2,19	(0 °C)	KF	1,44
Hafnium	13,36	2130	...	0,035	5,9	...	32,7	(0 °C)	HD	1,59
Helium	$0{,}1664 \times 10^{-3}$	–271,4	–268,9	1,25	...	$3{,}32 + 10^{-4}$	...		HD	...
Holmium	8,76	~ 1200	...	...	...	...	...		HD	1,76
Indium	7,31	156,4	...	0,057	33	0,057	8,37	(0 °C)	TFZ	1,57
Iridium	22,5	2454	5300	0,031	6,8	0,14	5,3	(20 °C)	KF	1,35
Jod	4,93	114	183	0,052	93	$10{,}4 \times 10^{-4}$	$1{,}3 \times 10^{15}$	(20 °C)	O	(1,36)
Kalium	0,86	63	770	0,177	83	0,24	6,15	(0 °C)	KR	2,38
Kobalt	8,8	1495	2900	0,102	14,2	0,165	5,6	(0 °C)	HD	1,25
Kohlenstoff	2,22	3700	4830	0,165	0,6 – 4,3	0,057	1375	(0 °C)	H	0,77
Krypton	$3{,}488 \times 10^{-3}$	–157	–152	...	...	$0{,}21 \times 10^{-4}$	...		KF	1,97
Kupfer	8,96	1083	2600	0,092	16,5	0,94	1,673	(20 °C)	KF	1,28
Lanthan	6,19	866	4340	0,048	...	...	65–75	(20 °C)	HD	1,87
Lithium	0,53	186	1370	0,79	56	0,17	8,55	(0 °C)	KR	1,57
Lutetium	9,74	...	...	...	...	...	...		HD	1,73
Magnesium	1,74	650	1120	0,25	26	0,38	4,46	(20 °C)	HD	1,60
Mangan	7,43	1245	2150	0,115	22	...	185	(20 °C)	Ct	(1,60)
Molybdän	10,2	2622	4804	0,061	5,1	0,32	5,17	(0 °C)	KR	1,40
Natrium	0,97	97,7	892	0,295	71	0,32	4,2	(0 °C)	KR	1,92
Neodym	6,98	820	...	0,046	...	...	70	(20 °C)	HD	1,82
Neon	$0{,}8387 \times 10^{-3}$	–248,6	–246,0	...	...	0,00011	...		KF	1,60
Neptunium	...	...	...	...	...	...	...		...	...
Nickel	8,90	1455	2730	0,105	13,3	0,22	6,84	(20 °C)	KF	1,25
Niob	8,57	2415	...	0,065	7,1	...	13,1	(18 °C)	KR	1,47
Osmium	22,5	2700	5500	0,031	4,6	...	9,5	(20 °C)	HD	1,35
Palladium	12,0	1554	4000	0,058	11,8	0,17	10,8	(20 °C)	KF	1,37
Phosphor (gelb)	1,82	44,1	280	0,177	125	...	10^{17}	(11 °C)	K	(1,09)
Platin	21,45	1773,5	4410	0,032	8,9	0,17	9,83	(0 °C)	KF	1,38

Mechanische Eigenschaften der Elemente (Forts.)

Element	Dichte bei 20 °C, g/cm³	Schmelzpunkt, °C	Siedepunkt °C	Spez. Wärme bei 20°C, cal /(g) (°C)	Lin. Ausdehnungskoeffizient bei 20 °C, pro °C × 10⁻⁶	Therm. Leitfähigkeit bei 20 °C, cal/(sec)(cm)(°C)	Spez. Widerstand bei T °C Mikro-Ohm cm	Kristallstruktur*	Atomradien n. Goldschmidt, Å
Plutonium	19,6	632	3235	...	$50{,}3 \times 10^{-6}$	...	...	...	...
Polonium	9,51	254	912	...	24,4	...	140 ...	M	(1,40)
Praseodym	6,78	950	3020	0,049	...	...	75 (20 °C)	HD	1,83
Protaktinium	...	3000	...	...	...	...	...	...	...
Quecksilber	13,55	−38,87	357	0,033	...	0,0201	94,1 (0 °C)	R	1,55
Radium	5,0	400	...	...	...	...	...	...	...
Radon	4,40	−71	−61,8	...	...	...	...	...	...
Rhenium	20	3170	...	0,033	...	...	...	HD	1,38
Rhodium	12,41	1966	4500	0,059	12,1	0,21	4,3 (0 °C)	KF	1,34
Rubidium	1,53	39	680	0,080	90	...	12,5 (20 °C)	KR	2,51
Ruthenium	12,2	2500	4900	0,057	9,1	...	7,6 (0 °C)	HD	1,34
Samarium	6,93	> 1300	...	...	...	...	...	...	...
Sauerstoff	$1{,}3318 \times 10^{-3}$	−218,8	−183,0	0,218	...	0,000059	...	K	0,60
Scandium	2,5	1400	...	...	...	...	...	KF	1,60
Schwefel	2,07	119,0	444,6	0,175	64	$6{,}31 \times 10^{-4}$	2×10^{23} (20 °C)	OFZ	(1,04)
Selen	4,81	220	680	0,084	37	...	...	H	(1,16)
Silizium	2,33	1430	2300	0,162	2,8–7,3	0,20	10^{5} (0 °C)	DG	(1,17)
Silber	10,49	960,5	2212	0,056	20,6	1,0	1,47 (10 °C)	KF	1,44
Stickstoff	$1{,}1649 \times 10^{-3}$	−210,0	−195,8	0,247	...	0,000060	...	H	0,71
Strontium	2,6	770	1380	0,176	...	...	23 (20 °C)	KF	2,15
Tantal	16,6	2996	...	0,036	6,5	0,13	12,4 (18 °C)	KR	1,47
Tellur	6,24	450	1390	0,047	16,8	0,14	2×10^{5} (19,6 °C)	H	(1,43)
Terbium	8,33	> 1400	...	...	...	...	...	HD	1,77
Thallium	11,85	300	1460	0,031	28	0,093	18 (0 °C)	HD	1,71
Thorium	11,71	1690	> 3000	0,028	11,15	0,09	18 (20 °C)	KF	1,80
Thulium	9,35	...	...	...	...	...	...	HD	1,74
Titan	4,51	1690	3535	0,137	8,5	0,41	48 (20 °C)	HD	1,47
Uran	19,1	1,133	3900	0,028	14,5	0,060	25–50 (25 °C)	O	(1,38)

Element	Dichte bei 20 °C, g/cm³	Schmelzpunkt, °C	Siedepunkt, °C	Spez. Wärme bei 20 °C cal/(g) (°C)	Lin. Ausdehnungskoeffizient bei 20 °C, pro °C × 10^{-6}	Therm. Leitfähigkeit bei 20° C cal/(sec)(cm)(°C)	Spez. Widerstand bei T °C Mikro-Ohm-cm	Kristallstruktur*	Atomradien n. Goldschmidt, Å
Vanadium	6,1	1710	3400	0,127	8,3	0,07	25 (20 °C)	KR	1,36
Wasserstoff	0,08375 × 10^{-3}	−259,4	−252,7	3,45	...	4,06 × 10^{-4}	...	H	0,46
Wismut	9,80	271	1627	0,29	13,4	0,019	106,8 (0 °C)	R	1,82
Wolfram	19,2	3395	5930	0,032	4,4	0,40	5,5 (20 °C)	KR	1,41
Xenon	5,495 × 10^{-3}	−112	−108,0	...	...	1,24 × 10^{-4}	...	KF	2,18
Ytterbium	7,01	1800	...	..	...	...	...	KF	1,93
Yttrium	5,51	1475	...	...	...	...	...	HD	1,81
Zink	7,133	419,46	906	0,0915	39,7	0,27	5,916 (20 °C)	HD	1,37
Zinn	7,298	231,9	2270	0,054	23	0,16	11,5 (20 °C)	RT	1,58
Zircon	6,5	1845	...	0,069	5	0,057	41,0 (0 °C)	HD	1,60

* FF = Kubisch-Flächenzentriert; R = Rhomboedrisch; KR = Kubisch-Raumzentriert; HD = Hexagonal dichteste Packung; O = Orthorhombisch; H = Hexagonal; T = Tetragonal; DS = Diamantgitter; EFO = Einflächenzentriert Orthorhombisch; M = Monoklin; RT = Raumzentriert Tetragonal; N = Kubisch; OFZ = Orthogonal-Flächenzentriert; TFZ = Tetragonal-Flächenzentriert.

Strahlenschäden bei Kunststoffen

Die Tabelle gibt für verschiedene Kunststoffe und Gummisorten bekannte Werte für die höchstzulässigen Neutronen- und γ-Dosen an, die die Beständigkeit der Stoffe noch nicht gefährden
(Unter Verwendung von: C. G. Collins u. V. P. Calkins, APEX-261, 1956)

Chemische Bezeichnung	Höchst-zulässige Dauer-Temperat. in °C	Zulässiger integraler Neutronenfluß in n/cm²		Zulässige integrale Gamma-		Gebrauchs- und Handelsnamen
		therm.	schnell	Dosis in r	Fluß in γ/cm²	
Polymethylbutad.	60	$2 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{14} - 6 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{6} - 2 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10 - 5 \cdot 10^{1015}$	Naturgummi
Butadien-Styrol-polymere	75	$2 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{6} - 1 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$	Buna S, Hycar OS
Butadien-Acryl-nitril	85	$4 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{6} - 7 \cdot 10^{6}$	$4 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	Nitrilkautschuk, Perbunan
Isopren-Isobutylen	100	$1 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{6} - 4 \cdot 10^{6}$	$3 \cdot 10^{15} - 7 \cdot 10^{15}$	Butylkautschuk
Chloroprenpolym.	>100	$5 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{6} - 6 \cdot 10^{6}$	$4 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	Neopren
Siliconpolymere	180	$1 \cdot 10^{17}$ – ca. 10^{18}	$3 \cdot 10^{14}$ – ca. $2 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{5}$ – ca. $8 \cdot 10^{6}$	$1 \cdot 10^{15}$ – ca. 10^{16}	Silopren, Silastic
Chlorsulf. Poly-äthylen	100	ca. 10^{16}		ca. 10^{7}	ca. 10^{17}	Hypalon
Organ. Polysulfide	50	$4 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{5} - 1 \cdot 10^{6}$	$1 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{15}$	Perduren Thiokol
Polyäthylen	70–120	$2 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{19}$	$4 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{7} - 9 \cdot 19^{7}$	$3 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17}$	Hostalen, Lupolen Trolen, Vestolen
Polystyrol	65–80	$1 \cdot 10^{20} - 7 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{17} - > 10^{18}$	$8 \cdot 10^{8} - > 4 \cdot 10^{9}$	$1 \cdot 10^{18} - > 8 \cdot 10^{18}$	Trolitul, Vestyron
Polystyrol-Misch-polymere		ca. 10^{19}		ca. 10^{8}	ca. 10^{17}	Novodur
Polyvinylcarbazol	170	$2 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{18}$	$9 \cdot 10^{7} - 4 \cdot 10^{9}$	$1 \cdot 10^{17} - 9 \cdot 10^{18}$	Luvican
Polyvinylchlorid	50–60	$6 \cdot 10^{16} - 4 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{16} - 6 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{7} - 1 \cdot 10^{8}$	$4 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$	PVC, Vestolit, Vinnol

Chemische Bezeichnung	Höchstzulässige Dauer-Temperat. in °C	Zulässiger integraler Neutronenfluß in n/cm²		Zulässige integrale Gamma-		Gebrauchs- und Handelsnamen
		therm.	schnell	Dosis in r	Fluß in γ/cm^2	
Polytetrafluoräthylen	280	$5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{4} - 4 \cdot 10^{4}$	$4 \cdot 10^{13} - 8 \cdot 10^{13}$	Teflon, Fluon
Polytrifluorchloräthyl.	190	$5 \cdot 10^{15} - 8 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{15} - 7 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{6} - 2 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{16}$	Hostaflon, Fluorothen
Polyvinyläther	50			ca. 10^{7}	ca. 10^{15}	Lutonal, Oppanol C
Polyacrylester, Polymethacrylderivate	80–105	$1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{5} - 1 \cdot 10^{7}$	$1 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$	Plexiglas, Plexigum
Vinylchloridacetat-polymere	50–60	$6 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	$7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{6} - 2 \cdot 10^{6}$	$3 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{15}$	Vinnol H 13
Vinyl-vinylidenchlorid	50–60	$9 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{6} - 5 \cdot 10^{7}$	$9 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{17}$	Vestan, Saran
Phenolharze mit mineral. Füllstoff	175	$3 \cdot 10^{18} - 8 \cdot 10^{20}$	$8 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{7} - 4 \cdot 10^{9}$	$3 \cdot 10^{16} - 8 \cdot 10^{18}$	Bakelite
Phenolharze mit organ. Füllstoff	120	$7 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{5} - 2 \cdot 10^{7}$	$7 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{16}$	Trolitan
Phenolharze ohne Füllstoff	100–150	$5 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{6} - 1 \cdot 10^{7}$	$5 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$	Pollopas
Harnstoffharze	100	$3 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$	$9 \cdot 10^{6} - 5 \cdot 10^{7}$	$1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17}$	Urecoll F
Melaminharze	120–140	$2 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{15} - 6 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{6} - 1 \cdot 10^{8}$	$1 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$	Ultrapas, Resopal
Anilinharze	115	$1 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{5} - 1 \cdot 10^{7}$	$1 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$	
Furanharze	125–150	$5 \cdot 10^{19} - 5 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{8} - 3 \cdot 10^{9}$	$7 \cdot 10^{17} - 7 \cdot 10^{18}$	Duralon

Chemische Bezeichnung	Höchst-zulässige Dauer-Temperat. in °C	Zulässiger integraler Neutronenfluß in n/cm²		Zulässige integrale Gamma-		Gebrauchs- und Handelsnamen
		therm.	schnell	Dosis in r	Fluß in γ/cm^2	
Polyester mit mineral. Füllstoff	100–130	$2 \cdot 10^{19} - 9 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{8} - 4 \cdot 10^{9}$	$1 \cdot 10^{17} - 8 \cdot 10^{18}$	Plaskon
Polyester ohne Füllst.	170	$8 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{5} - 1 \cdot 10^{6}$	$7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}$	Leguval
Polyamide, Polyurethane	150	$6 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{5} - 5 \cdot 10^{6}$	$1 \cdot 10^{15} - 9 \cdot 10^{15}$	Ultramid, Durethan, Perlon, Nylon
Siliconharze mit mineral. Füllstoff	250	ca. 10^{18}				
Siliconalkydharze	150			ca. 10^{9}	ca. 10^{17}	
Äthoxylinharze	60–100	ca. 10^{18}		ca. 10^{9}	ca. 10^{17}	Araldit
Zelluloseacetat	30–50	$5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{15} - 9 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{6} - 2 \cdot 10^{7}$	$5 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{16}$	Cellit, Trolit
Zelluloseacetobutyrat	50	$7 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{5} - 8 \cdot 10^{6}$	$7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$	Tenite
Zellulosenitrat		$1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{5} - 6 \cdot 10^{6}$	$1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	Pyralin
Zellulosepropionat		$8 \cdot 10^{16} - 8 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{5} - 5 \cdot 10^{6}$	$9 \cdot 10^{14} - 9 \cdot 10^{15}$	Forticel
Äthylzellulose	30–40	$2 \cdot 10^{17} - 9 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{6} - 6 \cdot 10^{6}$	$3 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	Trolit AE
Kasein-Kunststoffe	60–135	$5 \cdot 10^{16} - 4 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{6} - 3 \cdot 10^{7}$	$6 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16}$	Ameroid, Galalith

Umrechnungstabellen

Neutronenenergie, Wellenlänge, Geschwindigkeit und Flugzeit
$E = 1/2\, mv^2 = 1/2 \cdot h^2/m \cdot 1/\lambda^2;\ t = 1/v$

$\lambda =$	λ	$0{,}28696 \cdot E^{-1/2}$	$3{,}9554 \cdot 10^5\, v^{-1}$	$0{,}0039554 \cdot t$
$E =$	$0{,}081774 \cdot \lambda^{-2}$	E	$5{,}2269 \cdot 10^{-13}\, v^2$	$5226{,}9\, t^{-2}$
$v =$	$3{,}9554 \cdot 10^5 \cdot \lambda^{-1}$	$1{,}3832 \cdot 10^6\, E^{-1/2}$	v	$10^8\, t^{-21}$
$t =$	$252{,}82 \cdot \lambda$	$72{,}297 \cdot E^{-1/2}$	$10^8\, v^{-1}$	t

λ in Å; E in ev; v in cm s^{-1}; t in μs m^{-1}; Gültig mit 1,5% Genauigkeit für $E < 10$ MeV

Zeit

	s	min	h	d	w	a
1 s =	1	$1{,}667 \cdot 10^{-2}$	$2{,}778 \cdot 10^{-4}$	$1{,}157 \cdot 10^{-5}$	$1{,}653 \cdot 10^{-6}$	$3{,}169 \cdot 10^{-9}$
1 min =	60	1	$1{,}66 \cdot 10^{-2}$	$6{,}944 \cdot 10^{-4}$	$9{,}90 \cdot 10^{-5}$	$1{,}901 \cdot 10^{-6}$
1 h =	3600	60	1	$4{,}166 \cdot 10^{-2}$	$5{,}952 \cdot 10^{-3}$	$1{,}143 \cdot 10^{-4}$
1 d =	$8{,}64 \cdot 10^4$	$1{,}44 \cdot 10^3$	24	1	0,1428	$2{,}738 \cdot 10^{-3}$
1 w =	$6{,}048 \cdot 10^5$	$1{,}01 \cdot 10^4$	$1{,}68 \cdot 10^2$	7	1	0,191
1 a =	$3{,}156 \cdot 10^6$	$5{,}25 \cdot 10^5$	$8{,}76 \cdot 10^3$	365,26	52,1	1

Winkel

	Grad	Neugrad	Radiant	Umdrehung
1 Grad =	1	1,11	$1{,}745 \cdot 10^{-2}$	$2{,}778 \cdot 10^{-3}$
1 Neugrad =	0,9	1	$1{,}571 \cdot 10^{-2}$	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$
1 Radiant =	57,3	63,7	1	0,1592
1 Umdrehg. =	360	400	6,283	1

Längen

	mm	m	in	ft	yd
1 mm =	1	0,001	0,03937	$3{,}281 \cdot 10^{-3}$	$1{,}094 \cdot 10^{-3}$
1 m =	1000	1	39,37	3,281	1,094
1 in =	25,4	0,0254	1	0,08333	0,02778
1 ft =	304,8	0,3048	12	1	0,3333
1 yd =	914,4	0,9144	36	3	1

1 mile = 1,609 km; 1 micro in = 10^{-6} in; 1 mil = 1 thou = 0,001 in

Flächen

	m^2	cm^2	in^2	ft^2	yd^2
1 m^2 =	1	10^4	1550	10,76	1,196
1 cm^2 =	10^{-4}	1	0,155	$1{,}08 \cdot 10^{-3}$	$1{,}196 \cdot 10^{-4}$
1 in^2 =	$6{,}45 \cdot 10^{-4}$	6,452	1	$6{,}49 \cdot 10^{-3}$	$7{,}716 \cdot 10^{-4}$
1 ft^2 =	0,0929	929	144	1	0,1111
1 yd^2 =	0,8361	8361	1296	9	1

1 sq mile = 2,59 km^2; in^2 = sq. in.; ft^2 = sq ft; yd^2 = sq yd.; 1 acre = 4046,9 m^2

Geschwindigkeit

	km h^{-1}	cm s^{-1}	ft s^{-1}	ft hr^{-1}	miles hr^{-1}
1 km h^{-1} =	1	27,777	0,911	3280,46	0,6222
1 cm s^{-1} =	0,036	1	0,0328	118,1	0,0224
1 ft s^{-1} =	1,0977	30,48	1	3600	0,6818
1 ft hr^{-1} =	$3{,}048 \cdot 10^{-4}$	$8{,}47 \cdot 10^{-3}$	$2{,}78 \cdot 10^{-4}$	1	$1{,}89 \cdot 10^{-4}$
1 miles hr^{-1} =	1,609	44,70	1,467	5280	1

Volumen

	cu. in.	cu. ft.	US-liquid quart	US-gallon	Imp. quart	Imp. gallon	cm³	dm³ (l)	m³
1 cu. in. =	1	—	0,01732	—	0,01442	—	16,39	0,01639	—
1 cu. ft. =	1728	1	29,92	7,481	24,92	6,229	—	28,32	0,02832
1 cu. yd. =	46656	27	807,9	202	672,8	168,2	—	764,6	0,7646
1 US-liquid quart =	57,75	0,03342	1	0,25	0,8327	0,2082	946,4	0,9464	—
1 US-gallon =	231	0,1337	4	1	3,331	0,8327	3785	3,785	—
1 Imp.quart =	69,36	0,04014	1,201	0,3002	1	0,25	1136	1,136	—
1 Imp.gallon =	277,4	0,1605	4,804	1,201	4	1	4546	4,546	—
1 cm³ =	0,06102	—	—	—	—	—	1	0,001	—
1 dm³ (l) =	61,02	0,03531	1 057	0,2642	0,88	0,22	1000	1	0,001
1 m³ =	61023	35,31	1057	264,2	880	220	—	1000	1

Gewicht

	dram	oz.	lb.	stone	ton USA[1])	ton engl.[2])	cwt. US	cwt. engl.	p	kp	Mp
1 dram =	1	0,0625	0,003906	—	—	—	—	—	1,772	—	—
1 oz. =	16	1	0,0625	0,004464	—	—	—	—	28,35	0,02835	—
1 lb. =	256	16	1	0,07143	—	—	0,01	0,008929	453,6	0,4536	—
1 stone =	3584	224	14	1	0,007	0,00625	0,14	0,125	6350	6,35	—
1 US-ton[1]) =	—	32000	2000	142,9	1	0,8929	20	17,86	—	907,2	0,9072
1 engl. ton[2]) =	—	35840	2240	160	1,12	1	22,4	20	—	1016	1,016
1 US-cwt. =	25600	1600	100	7,143	0,05	0,04464	1	0,8929	45359	45,36	0,04536
1 engl. cwt. =	28672	1792	112	8	0,056	0,05	1,12	1	50802	50,8	0,0508
1 p =	0,5644	0,03527	0,002205	—	—	—	—	—	1	0,001	—
1 kp =	564,4	35,27	2,205	0,1575	—	—	0,02205	0,01968	1000	1	0,001
1 Mp =	—	—	2205	157,5	1,102	0,9842	22,05	19,68	—	1000	1

[1]) short ton [2]) long ton

Energie

	ft lb	erg	J (Ws)	mkp	PSh
1 ft lb =	1	$1{,}356 \cdot 10^{7}$	1,356	0,1383	$0{,}5121 \cdot 10^{-6}$
1 erg =	$0{,}7376 \cdot 10^{-7}$	1	10^{-7}	$0{,}102 \cdot 10^{-7}$	$37{,}77 \cdot 10^{-15}$
1 J (Ws) =	0,7376	10^{7}	1	0,102	$377{,}7 \cdot 10^{-9}$
1 mkp =	7,233	$9{,}087 \cdot 10^{7}$	9,807	1	$3{,}704 \cdot 10^{-6}$
1 PSh =	$1{,}953 \cdot 10^{6}$	$26{,}48 \cdot 10^{12}$	$2{,}648 \cdot 10^{6}$	$270 \cdot 10^{3}$	1
1 HPh =	$1{,}98 \cdot 10^{6}$	$26{,}85 \cdot 10^{12}$	$2{,}685 \cdot 10^{6}$	$273{,}8 \cdot 10^{3}$	1,014
1 kWh =	$2{,}655 \cdot 10^{6}$	$36{,}10 \cdot 10^{12}$	$3{,}6 \cdot 10^{6}$	$367{,}1 \cdot 10^{3}$	1,36
1 kcal =	$3{,}087 \cdot 10^{3}$	$41{,}86 \cdot 10^{9}$	4186	426,9	$1{,}581 \cdot 10^{-3}$
1 Btu =	778,6	$10{,}55 \cdot 10^{9}$	1055	107,6	$3{,}984 \cdot 10^{-4}$
1 MeV =	$1{,}182 \cdot 10^{-13}$	$1{,}602 \cdot 10^{-6}$	$1{,}602 \cdot 10^{-13}$	$1{,}634 \cdot 10^{-14}$	$6{,}055 \cdot 10^{-20}$
1 ME =	$1{,}099 \cdot 10^{-10}$	$1{,}492 \cdot 10^{-3}$	$1{,}492 \cdot 10^{-1}$	$1{,}519 \cdot 10^{-13}$	$5{,}625 \cdot 10^{-17}$
1 g =	$6{,}622 \cdot 10^{13}$	$8{,}978 \cdot 10^{20}$	$8{,}978 \cdot 10^{13}$	$0{,}915 \cdot 10^{13}$	$3{,}391 \cdot 10^{7}$

Leistung

	erg s^{-1}	W	mkp s^{-1}	PS
1 erg s^{-1} =	1	10^{-7}	$0{,}102 \cdot 10^{-7}$	$0{,}136 \cdot 10^{-9}$
1 W =	10^{7}	1	0,102	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$
1 mkp s^{-1} =	$9{,}807 \cdot 10^{7}$	9,807	1	$13{,}33 \cdot 10^{-3}$
1 PS =	$7{,}355 \cdot 10^{9}$	735,5	75	1
1 HP =	$7{,}457 \cdot 10^{9}$	745,7	76,04	1,014
1 kW =	10^{10}	1000	102	1,36
1 kcal s^{-1} =	$41{,}86 \cdot 10^{9}$	4186	426,9	5,692
1 Btu s^{-1} =	$10{,}55 \cdot 10^{9}$	1055	107,6	1,434
1 ft lb s^{-1} =	$1{,}356 \cdot 10^{7}$	1,356	$1{,}382 \cdot 10^{-1}$	$1{,}843 \cdot 10^{-3}$
1 MeV s^{-1} =	$1{,}602 \cdot 10^{-6}$	$1{,}602 \cdot 10^{-13}$	$1{,}634 \cdot 10^{-14}$	$0{,}218 \cdot 10^{-15}$

HPh	kWh	kcal	Btu	MeV	ME	g
$0{,}505 \cdot 10^{-6}$	$0{,}3768 \cdot 10^{-6}$	$0{,}324 \cdot 10^{-3}$	$1{,}286 \cdot 10^{-3}$	$0{,}8463 \cdot 10^{13}$	$0{,}908 \cdot 10^{10}$	$0{,}151 \cdot 10^{-13}$
$37{,}25 \cdot 10^{-15}$	$27{,}79 \cdot 10^{-15}$	$23{,}9 \cdot 10^{-12}$	$94{,}78 \cdot 10^{-12}$	$6{,}242 \cdot 10^{5}$	$6{,}698 \cdot 10^{2}$	$0{,}1114 \cdot 10^{-20}$
$372{,}5 \cdot 10^{-9}$	$277{,}9 \cdot 10$	$239 \cdot 10^{-6}$	$947{,}8 \cdot 10^{-6}$	$6{,}242 \cdot 10^{12}$	$6{,}698 \cdot 10^{9}$	$0{,}1114 \cdot 10^{-13}$
$3{,}653 \cdot 10^{-6}$	$2{,}725 \cdot 10^{-6}$	$2{,}344 \cdot 10^{-3}$	$9{,}301 \cdot 10^{-3}$	$6{,}124 \cdot 10^{13}$	$6{,}571 \cdot 10^{10}$	$1{,}092 \cdot 10^{-13}$
0,9863	0,7355	632,5	2510	$1{,}653 \cdot 10^{19}$	$1{,}778 \cdot 10^{16}$	$0{,}2949 \cdot 10^{-7}$
1	0,7457	641,3	2545	$1{,}676 \cdot 10^{19}$	$1{,}896 \cdot 10^{16}$	$0{,}2991 \cdot 10^{-7}$
1,341	1	860	3413	$2{,}247 \cdot 10^{19}$	$2{,}411 \cdot 10^{16}$	$0{,}402 \cdot 10^{-7}$
$1{,}559 \cdot 10^{-3}$	$1{,}163 \cdot 10^{3}$	1	3,968	$2{,}614 \cdot 10^{16}$	$2{,}804 \cdot 10^{13}$	$0{,}4663 \cdot 10^{-10}$
$392{,}6 \cdot 10^{-6}$	$293 \cdot 10^{-6}$	0,252	1	$6{,}586 \cdot 10^{15}$	$7{,}067 \cdot 10^{12}$	$0{,}1175 \cdot 10^{-10}$
$5{,}970 \cdot 10^{-20}$	$4{,}452 \cdot 10^{-17}$	$3{,}828 \cdot 10^{-20}$	$1{,}519 \cdot 10^{-16}$	1	$1{,}073 \cdot 10^{-3}$	$0{,}1789 \cdot 10^{-26}$
$5{,}54 \cdot 10^{-17}$	$4{,}14 \cdot 10^{-17}$	$3{,}244 \cdot 10^{-14}$	$1{,}58 \cdot 10^{-13}$	931,8	1	$1{,}66 \cdot 10^{-24}$
$3{,}344 \cdot 10^{7}$	$2{,}496 \cdot 10^{7}$	$1{,}956 \cdot 10^{10}$	$9{,}519 \cdot 10^{1}$	$5{,}604 \cdot 10^{26}$	$6{,}025 \cdot 10^{23}$	1

HP	kW	kcal s^{-1}	Btu s^{-1}	ft lb s^{-1}	MeV s^{-1}
$0{,}1341 \cdot 10^{-9}$	10^{-10}	$23{,}9 \cdot 10^{-12}$	$94{,}84 \cdot 10^{-12}$	$0{,}7376 \cdot 10^{-}$	$6{,}242 \cdot 10^{5}$
$1{,}341 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$239 \cdot 10^{-6}$	$948{,}4 \cdot 10^{-6}$	0,7376	$6{,}242 \cdot 10^{12}$
$13{,}15 \cdot 10^{-3}$	$9{,}807 \cdot 10^{-3}$	$2{,}344 \cdot 10^{-3}$	$9{,}296 \cdot 10^{-3}$	7,233	$6{,}124 \cdot 10^{13}$
0,9868	0,7355	0,1758	0,6971	$5{,}424 \cdot 10^{3}$	$4{,}59 \cdot 10^{15}$
1	0,7457	0,1782	0,7067	$5{,}50 \cdot 10^{3}$	$4{,}65 \cdot 10^{15}$
1,341	1	0,239	0,9484	$0{,}7376 \cdot 10^{3}$	$6{,}242 \cdot 10^{15}$
5,614	4,186	1	3,9806	$3{,}052 \cdot 10^{4}$	$2{,}614 \cdot 10^{16}$
1,415	1,055	0,252	1	$7{,}783 \cdot 10^{2}$	$6{,}586 \cdot 10^{15}$
$1{,}818 \cdot 10^{-3}$	$1{,}356 \cdot 10^{-3}$	$3{,}239 \cdot 10^{-4}$	$1{,}285 \cdot 10^{-3}$	1	$0{,}8463 \cdot 10^{13}$
$0{,}215 \cdot 10^{-15}$	$1{,}602 \cdot 10^{-16}$	$3{,}828 \cdot 10^{-20}$	$1{,}519 \cdot 10^{-16}$	$1{,}182 \cdot 10^{-13}$	1

	p cm^{-3}	lb ft^{-3}	p l^{-1}	kp m^{-3}
1 p cm^{-3} =	1	62,43	$1 \cdot 10^3$	10^3
1 lb ft^{-3} =	0,016	1	16,02	16,02
1 p l^{-1} =	$1 \cdot 10^{-3}$	$6,243 \cdot 10^{-2}$	1	1
1 kp m^{-3} =	10^{-3}	$6,243 \cdot 10^{-2}$	1	1

spez. Gewicht

Durchflußmenge

	p s^{-1}	lb h^{-1}	kp h^{-1}
1 p s^{-1} =	1	7,937	3,6
1 lb h^{-1} =	0,126	1	0,454
1 kp h^{-1} =	0,278	2,205	1

Druck und Spannung

	µb	mb	b	kp/m²	p/cm²	kp/cm² = at	kp/mm²	Torr	Atm	lb./sq.ft.	lb./sq.in.	engl. ton/sq.in	US-ton/sq.in.
1 µb = 1dyn/cm² =	1	0,001	—	0,0102	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1 mb =	1000	1	0,001	10,2	1,02	—	—	0,7501	—	2,089	0,0145	—	—
1 b (abs. Atm.) =	10^6	1000	1	10197	1020	1,02	0,0102	750,1	0,9869	2089	14,5	0,006475	0,007375
1 kp/m²*) =	98,07	—	—	1	0,1	0,0001	—	—	—	0,2048	—	—	—
1 p/cm² =	980,7	0,9807	—	10	1	0,001	—	0,7356	—	2,048	0,01422	—	—
1 m WS bei 4° C =	98067	98,07	—	1000	100	0,1	0,001	73,56	—	204,8	1,422	—	—
1 kp/cm² = 1at** =	—	980,7	0,9807	10000	1000	1	0,01	735,6	0,9678	2048	14,22	—	—
1 kp/mm² =	—	98067	98,07	10^6	10^5	100	1	73556	96,78	—	1422	0,635	0,7112
1 Torr¹) =	1333	1,333	—	13,6	1,36	0,00136	—	1	—	2,785	0,01934	—	—
1 Atm.²) =	—	1013	1,013	10332	1033	1,033	—	760	1	2116	14,7	—	—
1 lb./sq.ft. =	478,8	0,4788	—	4,882	0,4882	—	—	0,3591	—	1	—	—	—
1 lb./sq.in ≡ 1psi =	68948	68,95	0,06895	703,1	70,31	0,07031	—	51,71	—	144	1	—	0,0005
1 engl.ton/sq.in. =	—	—	154,4	—	—	157,5	1,575	—	152,4	—	2240	1	1,12
1 US-ton/sq.in. =	—	—	137,9	—	—	140,6	1,406	—	136,1	—	2000	0,8929	1

*) = 1 mm WS bei 4 C   **) = 1 techn. Atmosphäre   ¹) = 1 mm Hg bei 0 C   ²) = 1 physikal. Atmosphäre

Leistungsdichte

	MeV s^{-1} cm^{-3}	W ft^{-3}	Btu s^{-1} ft^{-3}	kW m^{-3}	erg s^{-1} cm^{-3}	kcal m^{-3} h^{-1}
1 MeV s^{-1} cm^{-3} =	1	$4{,}54 \cdot 10^{-9}$	$4{,}30 \cdot 10^{-12}$	$1{,}602 \cdot 10^{-10}$	$1{,}604 \cdot 10^{-6}$	$1{,}378 \cdot 10^{-7}$
1 W ft^{-3} =	$2{,}203 \cdot 10^{8}$	1	$9{,}473 \cdot 10^{-4}$	35,32	$3{,}534 \cdot 10^{2}$	$3{,}038 \cdot 10^{4}$
1 Btu s^{-1} ft^{-3} =	$2{,}325 \cdot 10^{11}$	$1{,}056 \cdot 10^{2}$	1	37,26	$3{,}730 \cdot 10^{5}$	$3{,}204 \cdot 10^{4}$
1 kW m^{-3} =	$6{,}242 \cdot 10^{9}$	$2{,}831 \cdot 10^{-2}$	$2{,}684 \cdot 10^{-2}$	1	10^{4}	$8{,}598 \cdot 10^{2}$
1 erg s^{-1} cm^{-3} =	$6{,}232 \cdot 10^{5}$	$2{,}83 \cdot 10^{-3}$	$2{,}680 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	1	$8{,}598 \cdot 10^{-2}$
1 kcal m^{-3} h^{-1} =	$7{,}257 \cdot 10^{6}$	$3{,}292 \cdot 10^{-5}$	$3{,}121 \cdot 10^{-5}$	$1{,}163 \cdot 10^{-3}$	11,63	1

Dosisleistung

	D s^{-1}	D min^{-1}	D h^{-1}	D d^{-1}	D(Woche)$^{-1}$	D (40 h)$^{-1}$
1 D s^{-1} =	1	60	$3{,}6 \cdot 10^{3}$	$8{,}64 \cdot 10^{4}$	$6{,}048 \cdot 10^{5}$	$1{,}44 \cdot 10^{5}$
1 D min^{-1} =	$1{,}66 \cdot 10^{-2}$	1	60	$1{,}44 \cdot 10^{3}$	$1{,}01 \cdot 10^{4}$	$2{,}405 \cdot 10^{3}$
1 D h^{-1} =	$2{,}777 \cdot 19^{-4}$	$1{,}66 \cdot 10^{2}$	1	24	$1{,}68 \cdot 10^{2}$	$4{,}00 \cdot 10^{1}$
1 D d^{-1} =	$1{,}157 \cdot 10^{-5}$	$6{,}944 \cdot 10^{-4}$	$4{,}166 \cdot 10^{-2}$	1	7	1,667
1 D (Woche)$^{-1}$ =	$1{,}653 \cdot 10^{-6}$	$9{,}90 \cdot 10^{-5}$	$5{,}952 \cdot 10^{-3}$	0,1428	1	0,238
1 D (40 h)$^{-1}$ =	$6{,}944 \cdot 10^{-6}$	$4{,}158 \cdot 10^{-4}$	$2{,}50 \cdot 10^{-2}$	$6{,}00 \cdot 10^{-1}$	4,200	1

D= Dosiseinheit, z. B. r, rad, rem.

Wärmeübergangskoeffizienten

	W cm^{-2} °C^{-1}	cal s^{-1} cm^{-2} °C^{-1}	Btu ft^{-2} hr^{-1} °F^{-1}	kcal m^{-2} h^{-1} °C^{-1}
1 W cm^{-2} °C^{-1} =	1	0,239	1763	$8{,}598 \cdot 10^{3}$
1 cal s^{-1} cm^{-2} °C^{-1} =	4,183	1	7373	$3{,}6 \cdot 10^{4}$
1 Btu ft^{-2} hr^{-1} °F^{-1} =	$5{,}67 \cdot 10^{-4}$	$1{,}36 \cdot 10^{-4}$	1	4,880
1 kcal m^{-2} h^{-1} °C^{-1} =	$1{,}163 \cdot 10^{-4}$	$2{,}778 \cdot 10^{-5}$	0,205	1

Energiestromdichte

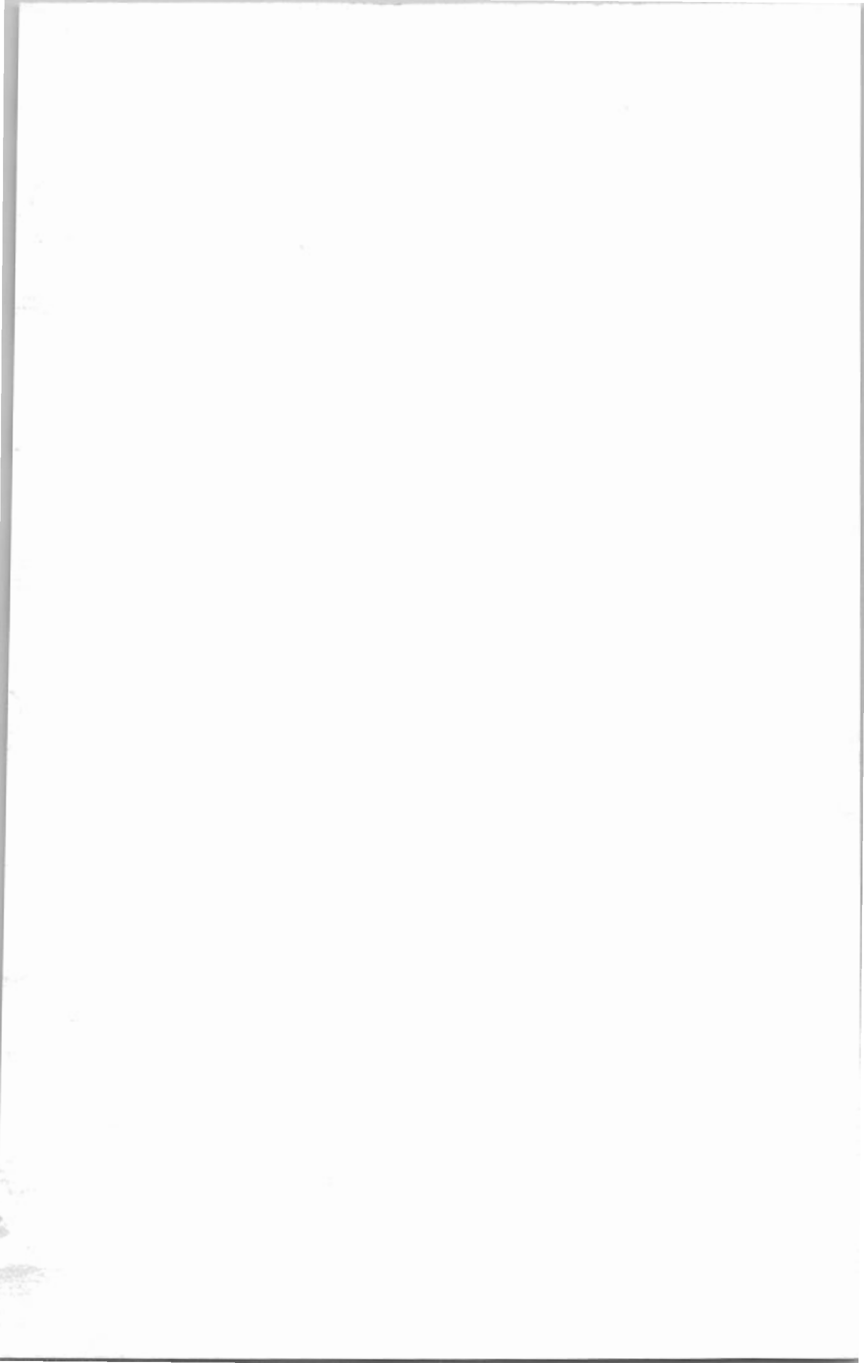
	W in^{-2}	W cm^{-2}	cal $cm^{-2}s^{-1}$	Btu ft^{-2} hr^{-1}	MeV $cm^{-2}s^{-1}$	kcal m^{-2} h^{-1}	kW m^{-2}
1 W in^{-2} =	1	0,155	0,0371	492	$1{,}259 \cdot 10^{+11}$	$1{,}333 \cdot 10^{3}$	1,55
1 W cm^{-2} =	6,452	1	0,239	3173	$8{,}11 \cdot 10^{+11}$	$8{,}598 \cdot 10^{3}$	10
1 cal cm^{-2} s^{-1} =	26,99	4,183	1	13272	$3{,}393 \cdot 10^{+12}$	$3{,}6 \cdot 10^{4}$	41,83
1 Btu ft^{-2} hr^{-1} =	$2{,}03 \cdot 10^{-3}$	$3{,}15 \cdot 10^{-4}$	$7{,}53 \cdot 10^{-5}$	1	$2{,}55 \cdot 10^{8}$	2,710	$3{,}15 \cdot 10^{-3}$
1 MeV cm^{-2} s^{-1} =	$7{,}945 \cdot 10^{-12}$	$1{,}233 \cdot 10^{-12}$	$2{,}947 \cdot 10^{-13}$	$3{,}914 \cdot 10^{-9}$	1	$1{,}378 \cdot 10^{-9}$	$1{,}233 \cdot 10^{-11}$
1 kcal m^{-2} h^{-1} =	$1{,}501 \cdot 10^{-4}$	$1{,}163 \cdot 10^{-4}$	$2{,}118 \cdot 10^{-5}$	0,369	$7{,}257 \cdot 10^{8}$	1	$1{,}163 \cdot 10^{-3}$
1 kW m^{-2} =	0,6452	0,1	$2{,}39 \cdot 10^{-2}$	317,3	$8{,}11 \cdot 10^{10}$	$8{,}598 \cdot 10^{2}$	1

Wärmeleitfähigkeit

	cal cm^{-1} s^{-1} °C^{-1}	Kcal m^{-1} h^{-1} °C^{-1}	Btu ft^{-1} h^{-1} °F^{-1}	Btu ft^{-2} in h^{-1} °F^{-1}
1 cal cm^{-1} s^{-1} °C^{-1} =	1	$3{,}6 \cdot 10^{2}$	$2{,}419 \cdot 10^{2}$	$2{,}953 \cdot 10^{3}$
1 Kcal m^{-1} h^{-1} °C^{-1} =	$2{,}778 \cdot 10^{-3}$	1	0,672	8,063
1 Btu ft^{-1} h^{-1} °F^{-1} =	$4{,}134 \cdot 10^{-3}$	1,488	1	12
1 Btu ft^{-2} · in h^{-1} °F^{-1} =	$3{,}44 \cdot 10^{-4}$	0,124	$8{,}33 \cdot 10^{-2}$	1

Weltbeste Daten der spaltbaren Kerne gegenüber 2200 m/s-Neutronen (1958)

	USA	England	UdSSR	Frank-reich	Kanada	Nor-wegen	Indien	gewogene Weltmittel	in sich widerspruchsfreie weltbeste Werte
^{233}U									
σ_a	585 ± 10	577 ± 10	590 ± 20					582 ± 7	581 ± 7
σ_f	533 ± 10	520 ± 12	525 ± 15		524 ± 4	521 ± 20		525 ± 3	527 ± 4
$1 + \alpha$	1,098 ± 0,008	1,11 ± 0,03	1,100 ± 0,005					1,100 ± 0,004	1,102 ± 0,005
η	2,28 ± 0,03	2,25 ± 0,04	2,31 ± 0,02					2,29 ± 0,02	2,28 ± 0,02
ν	2,50 ± 0,03	2,50 ± 0,07	2,62 ± 0,10					2,51 ± 0,03	2,51 ± 0,03
^{235}U									
σ_a	689 ± 7	725 ± 13	695 ± 20					697 ± 6	694 ± 8
σ_f	584 ± 10	596 ± 14	570 ± 15	584 ± 20	578 ± 6	587 ± 16	555 ± 15	579 ± 4	582 ± 6
$1 + \alpha$	1,18 ± 0,01	1,21 ± 0,03						1,18 ± 0,01	1,19 ± 0,01
η	2,06 ± 0,03	2,05 ± 0,04	2,08 ± 0,02					2,070 ± 0,015	2,07 ± 0,02
ν	2,43 ± 0,04	2,49 ± 0,06	2,54 ± 0,10					2,46 ± 0,03	2,47 ± 0,03
^{239}Pu									
σ_a	1025 ± 15	1006 ± 25	1035 ± 20					1025 ± 13	1026 ± 13
σ_f	748 ± 15	717 ± 16	715 ± 30	770 ± 20	754 ± 9			747 ± 6	746 ± 8
$1 + \alpha$	1,37 ± 0,03	1,40 ± 0,04						1,38 ± 0,02	1,38 ± 0,02
η	2,10 ± 0,03	2,07 ± 0,06	2,08 ± 0,02					2,085 ± 0,016	2,10 ± 0,02
ν	2,88 ± 0,06	2,90 ± 0,09	3,02 ± 0,10					2,91 ± 0,04	2,90 ± 0,04



HÖCKER
WEIMER

LEXIKON DER KERN- UND REAKTORTECHNIK

BAND I · A-K

FRANCKH